

**INSTITUTO FEDERAL GOIANO DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA  
PRÓ-REITORIA DE PESQUISA, PÓS-GRADUAÇÃO E INOVAÇÃO  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA APLICADA E  
SUSTENTABILIDADE - MESTRADO PROFISSIONAL  
CAMPUS RIO VERDE**

**ARGAMASSAS DE REVESTIMENTO À BASE DE  
BIOCHAR DO BAMBU E AREIA ARTIFICIAL**

Orientador: **Prof. Dr. Michell Macedo Alves**  
Coorientador: **Prof. D.Sc. Alex Neves Júnior**  
Discente: **Whellyson Viana Tamasauskas**

**RIO VERDE - GO  
2025**

**WHELLYSONN VIANA TAMASAUSKAS**

**ARGAMASSAS DE REVESTIMENTO À BASE DE  
BIOCHAR DO BAMBU E AREIA ARTIFICIAL**

Dissertação apresentada à banca examinadora como parte das exigências para obtenção do título de MESTRE em ENGENHARIA APLICADA E SUSTENTABILIDADE, do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Aplicada e Sustentabilidade do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia Goiano – Campus Rio Verde - Área de concentração: Engenharia Aplicada e Sustentabilidade.

Orientador: Prof. Dr. Michell Macedo Alves  
Coorientador: Prof. D.Sc. Alex Neves Júnior

**RIO VERDE - GO  
2025**

**Ficha de identificação da obra elaborada pelo autor, através do  
Programa de Geração Automática do Sistema Integrado de Bibliotecas do IF Goiano - SIBI**

T153a Tamasauskas, Whellysonn Viana  
ARGAMASSAS DE REVESTIMENTO À BASE DE  
BIOCHAR DO BAMBU E AREIA ARTIFICIAL / Whellysonn  
Viana Tamasauskas. Rio Verde 2026.

1f. il.

Orientador: Prof. Dr. Michell Macedo Alves.

Coorientador: Prof. Dr. Michel Macedo Alves  
Coorientador: Prof. Dr. Alex Neves Júnior.

Coorientador: Prof. Dr. Alex Nogueira Júnior.  
Dissertação (Mestre) - Instituto Federal Goiano, curso de 0233144 - Mestrado Profissional em Engenharia Aplicada e Sustentabilidade (Campus Rio Verde).

## I. Título.

## TERMO DE CIÊNCIA E DE AUTORIZAÇÃO PARA DISPONIBILIZAR PRODUÇÕES TÉCNICO-CIENTÍFICAS NO REPOSITÓRIO INSTITUCIONAL DO IF GOIANO

Com base no disposto na Lei Federal nº 9.610, de 19 de fevereiro de 1998, AUTORIZO o Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia Goiano a disponibilizar gratuitamente o documento em formato digital no Repositório Institucional do IF Goiano (RIIF Goiano), sem resarcimento de direitos autorais, conforme permissão assinada abaixo, para fins de leitura, download e impressão, a título de divulgação da produção técnica-científica no IF Goiano.

### IDENTIFICAÇÃO DA PRODUÇÃO TÉCNICO-CIENTÍFICA

- Tese (doutorado)  Artigo científico  
 Dissertação (mestrado)  Capítulo de livro  
 Monografia (especialização)  Livro  
 TCC (graduação)  Trabalho apresentado em evento  
 Produto técnico e educacional - Tipo: \_\_\_\_\_

Nome completo do autor:  
WHELLYSONN VIANA TAMASAUSKAS

Matrícula:  
202322331440003

Ítulo do trabalho:  
ARGAMASSAS DE REVESTIMENTO À BASE DE BIOCHAR DO BAMBU E AREIA ARTIFICIAL

### RESTRIÇÕES DE ACESSO AO DOCUMENTO

Documento confidencial:  Não  Sim, justifique:

\_\_\_\_\_

Informe a data que poderá ser disponibilizado no RIIF Goiano: 03 /02 /2028

O documento está sujeito a registro de patente?  Sim  Não

O documento pode vir a ser publicado como livro?  Sim  Não

### DECLARAÇÃO DE DISTRIBUIÇÃO NÃO-EXCLUSIVA

O(a) referido(a) autor(a) declara:

- Que o documento é seu trabalho original, detém os direitos autorais da produção técnica-científica e não infringe os direitos de qualquer outra pessoa ou entidade;
- Que obteve autorização de quaisquer materiais inclusos no documento do qual não detém os direitos de autoria, para conceder ao Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia Goiano os direitos requeridos e que este material cujos direitos autorais são de terceiros, estão claramente identificados e reconhecidos no texto ou conteúdo do documento entregue;
- Que cumpriu quaisquer obrigações exigidas por contrato ou acordo, caso o documento entregue seja baseado em trabalho financiado ou apoiado por outra instituição que não o Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia Goiano.

Rio verde

04 /12 /2026

Local

Data

Documento assinado digitalmente  
**gov.br** WHELLYSONN VIANA TAMASAUSKAS  
Data: 05/02/2026 08:07:38-0300  
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Assinatura do autor e/ou detentor dos direitos autorais

Documento assinado digitalmente  
**gov.br** MICHELL MACEDO ALVES  
Data: 04/02/2026 21:04:16-0300  
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Ciente e de acordo:



Ata nº 70/2025 - SREPG/CMPR/CPG-RV/DPGPI-RV/CMPRV/IFGOIANO

**PRÓ-REITORIA DE PESQUISA, PÓS-GRADUAÇÃO E INOVAÇÃO**  
**ATA DE DEFESA - PÓS-GRADUAÇÃO**

Unidade do IF Goiano:	Campus Rio Verde	
Programa de Pós-Graduação:	Engenharia Aplicada e Sustentabilidade	
Defesa de:	Dissertação	Defesa de número: 93
Data: 06/08/2025	Hora de início: 09:00h	Hora de encerramento: 12:00h
Matrícula do discente:	2023202331440003	
Nome do discente:	Whellysson Viana Tamasauskas	
Título do trabalho:	ARGAMASSAS DE REVESTIMENTO A BASE DE BIOCHAR DO BAMBU E AREIA ARTIFICIAL	
Orientador:	Michell Macedo Alves	
Área de concentração:	Engenharia Aplicada e Sustentabilidade	
Linha de Pesquisa:	Tecnologia e Ciência dos Materiais	
Projeto de pesquisa de vinculação	ADOÇÃO DE MATERIAIS SUSTENTÁVEIS NA CONSTRUÇÃO: IMPACTO DO BIOCHAR DE BAMBU E AREIA ARTIFICIAL NO DESEMPENHO DE ARGAMASSAS	
Titulação:	Mestre em Engenharia Aplicada e Sustentabilidade	

Nesta data, reuniram-se os componentes da Banca Examinadora, Prof. Dr. Michell Macedo Alves (Presidente da banca), Prof. Dr. Edgar Bacarji (Avaliador Externo) e Prof. Dr. Marcel Willian Reis Sales (Avaliador Interno) sob a presidência do primeiro, em sessão pública realizada de forma online, para procederem a avaliação da defesa de dissertação, em nível de Mestrado, de autoria de **WHELLYSONN VIANA TAMASAUSKAS**, discente do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Aplicada e Sustentabilidade do Instituto Federal Goiano – Campus Rio Verde. A sessão foi aberta pelo presidente da Banca Examinadora, Michell Macedo Alves, que fez a apresentação formal dos membros da Banca. A palavra, a seguir, foi concedida o(a) autor (a) da dissertação para, em 40 min., proceder à apresentação de seu trabalho. Terminada a apresentação, cada membro da banca arguiu o(a) examinado(a), tendo-se adotado o sistema de diálogo sequencial. Terminada a fase de arguição, procedeu-se a avaliação da defesa. Tendo-se em vista as normas que regulamentam o Programa de Pós-Graduação em Engenharia Aplicada e Sustentabilidade, e procedidas às correções recomendadas, a dissertação foi APROVADA, considerando-se integralmente cumprido este requisito para fins de obtenção do título de **MESTRE EM ENGENHARIA APLICADA E SUSTENTABILIDADE**. A conclusão do curso dar-se-á quando da entrega na secretaria do PPGEAS da versão definitiva da dissertação, com as devidas correções. Assim sendo, esta ata perderá a validade se não cumprida essa condição, em até **60** (sessenta) dias da sua ocorrência. A Banca Examinadora recomendou a publicação dos artigos científicos oriundos dessa Tese em periódicos de circulação nacional e/ou internacional, após procedida as modificações sugeridas. Cumpridas as formalidades da pauta, a presidência da mesa encerrou esta sessão de defesa de dissertação de mestrado, e foi lavrada a presente Ata, que, após lida e achada conforme, será assinada pelos membros da Banca Examinadora.

#### Decisão da banca: Aprovada

Esta defesa é parte dos requisitos necessários para a obtenção do título de Mestre em Engenharia Aplicada e Sustentabilidade.

O competente diploma será expedido após cumprimento dos demais requisitos, conforme as normas do Programa, a legislação pertinente e a regulamentação interna do IFGoiano.

Documento assinado eletronicamente por:

- **Michell Macedo Alves, PROFESSOR ENS BASICO TECN TECNOLOGICO**, em 07/08/2025 13:37:52.
- **Marcel Willian Reis Sales, PROFESSOR ENS BASICO TECN TECNOLOGICO**, em 07/08/2025 13:44:42.

Este documento foi emitido pelo SUAP em 27/06/2025. Para comprovar sua autenticidade, faça a leitura do QRCode ao lado ou acesse <https://suap.ifgoiano.edu.br/autenticar-documento/> e forneça os dados abaixo:

Código Verificador: 720884

Código de Autenticação: dff4b5727c



Documento assinado digitalmente  
EDGAR BACARJI  
Data: 15/08/2025 14:11:49-0300  
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

INSTITUTO FEDERAL GOIANO

Campus Rio Verde

Rodovia Sul Goiana, Km 01, Zona Rural, 01, Zona Rural, RIO VERDE / GO, CEP 75901-970  
(64) 3624-1000

## **AGRADECIMENTOS**

A Deus, que sempre esteve comigo nessa caminhada, guiando e fortalecendo nos momentos de dúvidas e angústias. À minha mãe, Eulina e ao meu pai Adirceu, agradeço por cada sacrifício, pelo amor incondicional, pela paciência infinita e por serem o alicerce em todas as etapas da minha vida. Esta conquista também é de vocês. À minha esposa, Thayza Facundes da Silva Viana, pelo apoio incondicional durante todo o período de estudos.

Ao meu professor orientador, Prof. Dr. Michell Macêdo Alves, pelos inestimáveis conhecimentos compartilhados e pela dedicação na condução deste trabalho. Meu agradecimento se estende ao coorientador, Prof. D.Sc. Alex Neves Junior, por sua valiosa colaboração e suporte. Minha gratidão se estende aos membros da banca examinadora, Prof. Dr. Marcel Willian Reis Sales, Prof. Dr. Edgar Bacarji, por terem aceitado o convite e pelas valiosas contribuições que, sem dúvida, enriqueceram este trabalho.

Agradecimento especial ao Instituto Federal Goiano – Campus Rio Verde, professores e coordenadores do PPGEAS. Obrigada pela oportunidade oferecida e por todos os ensinamentos. Por fim, a todos aqueles que contribuíram, direta ou indiretamente, para a realização desta dissertação, o meu sincero agradecimento.

## **BIOGRAFIA**

Whellyson Viana Tamasauskas, nascido em Imperatriz, Maranhão, em 1986, possui uma trajetória acadêmica e profissional diversificada. Graduado em Tecnologia em Construção de Edifícios (IFTO, 2013) e em Engenharia Civil (Uni-Anhanguera, 2017), aprofundou seus conhecimentos com pós-graduações que abrangem áreas como Engenharia de Segurança do Trabalho, Engenharia Clínica e Hospitalar e Engenharia em Manutenção Hospitalar.

Sua experiência profissional consolidada inclui atuação em projetos, obras públicas e privadas, orçamentos e licitações, com destaque para o acompanhamento de obras complexas nos setores hospitalar. Ingressou no Programa de Mestrado Profissional em Engenharia Aplicada e Sustentabilidade (PPGEAS) em 2023/2, realizando a defesa de sua dissertação em agosto de 2025.

## RESUMO

A crescente preocupação com a sustentabilidade na construção civil tem impulsionado pesquisas voltadas à substituição de materiais convencionais por alternativas de menor impacto ambiental. Neste contexto, o presente trabalho avaliou o desempenho de argamassas de revestimento com substituição parcial do cimento Portland por biochar de bambu e da areia lavada de rio por areia artificial proveniente do pó de brita. Foram produzidos cinco traços experimentais, com substituições graduais do cimento por biochar e da areia natural por areia artificial nos teores de 0%, 3%, 5%, 7% e 10%. Os ensaios realizados incluíram resistência à compressão, aderência à tração e absorção de água por capilaridade. A partir de uma revisão bibliográfica da literatura, constatou-se que a incorporação de biochar entre 1% e 5% pode melhorar a resistência mecânica das argamassas. As análises microestruturais indicaram aumento na formação de produtos de hidratação, o que contribui para a melhoria do desempenho mecânico. Os resultados experimentais confirmaram que a substituição de até 5% do cimento por biochar proporciona ganhos significativos em resistência à compressão e aderência, mantendo desempenho satisfatório em relação à absorção capilar. Por outro lado, traços com substituições superiores a 7% apresentaram redução no desempenho mecânico. Em relação ao agregado miúdo, a areia artificial demonstrou desempenho técnico compatível ao da areia natural, mostrando-se uma alternativa viável e sustentável. Conclui-se que a utilização combinada de biochar e areia artificial, em proporções adequadas, pode contribuir para o desenvolvimento de materiais de construção mais sustentáveis, sem comprometer as propriedades essenciais de resistência mecânica e durabilidade.

**Palavras-chave:** Materiais alternativos; Biochar; Areia artificial; Sustentabilidade.

## ABSTRACT

The growing concern with sustainability in the construction industry has driven to research aimed at replacing conventional materials by alternatives that have a lower environmental impact. In this context, the present study evaluated the performance of rendering mortars with partial replacement of Portland cement by bamboo biochar and river sand by manufactured sand derived from crushed stone dust. Five experimental mixes were produced, with gradual substitutions of cement by biochar and natural sand by manufactured sand at levels of 0%, 3%, 5%, 7%, and 10%. The tests performed included compressive strength, bond strength, and capillary water absorption. A systematic literature review revealed that incorporating biochar between 1% and 5% can improve the mechanical strength of mortars. Microstructural analyses indicated an increase in hydration products formation, contributing to the improvement in mechanical performance. Experimental results confirmed that replacing up to 5% of the cement by biochar leads to significant gains in compressive strength and adhesion, while maintaining satisfactory performance in terms of capillary absorption. On the other hand, mixes with substitutions above 7% showed a reduction in mechanical performance. Regarding the fine aggregate, manufactured sand demonstrated technical performance compatible with that of natural sand, proving to be a viable and sustainable alternative. It is concluded that combining biochar and manufactured sand, in appropriate proportions, can contribute to the development of more sustainable construction materials without compromising essential properties such as mechanical strength and durability.

**Keywords:** Alternative materials, Biochar, Artificial sand, Sustainability.

# SUMÁRIO

RESUMO.....	ix
ABSTRACT .....	x
LISTA DE FIGURAS .....	xii
LISTA DE TABELAS.....	xiii
LISTA DE GRÁFICOS.....	xiv
LISTA DE ABREVEATURAS E SIGLAS .....	xv
1. INTRODUÇÃO .....	1
2. REVISÃO DE LITERATURA.....	2
2.1    Construção civil e aquecimento global .....	2
2.2    Biochar como material cimentício suplementar .....	3
2.3    Argamassa de revestimento .....	5
2.4    Efeitos do Biochar nas Propriedades das Argamassas.....	6
3. JUSTIFICATIVA .....	7
4. OBJETIVOS .....	8
4.1.    Objetivo Geral .....	8
4.2.    Objetivos específicos .....	8
5. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....	9
6. CAPÍTULO 1 – ARTIGO 1 .....	11
RESUMO.....	12
ABSTRACT .....	13
6.1.    Introdução .....	14
6.2.    Materiais e métodos .....	15
6.3.    Resultados e discussões .....	23
6.4.    Conclusão.....	35
6.5.    Referências Bibliográficas (Capítulo 1 – Artigo 1) .....	35
7. CONSIDERAÇÕES FINAIS .....	40

**LISTA DE FIGURAS**

Figura 1 – Principais insumos utilizados nos traços experimentais	18
Figura 2 – Instrumentação laboratorial utilizada e finalidade	19
Figura 3 – Traços de argamassa em parede com substituição de cimento por biochar e areia natural por areia artificial (da esquerda para a direita: 3%, 5%, 7%, 10% e 0%).	21

**LISTA DE TABELAS**

Tabela 1 – Composição química do cimento CPII-F-32	16
Tabela 2 – Composição química do cimento CPV-ARI.	16
Tabela 3 – Composição química do biochar comercial.	17
Tabela 4 – Composição dos traços para argamassas de revestimento de $0,50 \times 0,50$ m.	20
Tabela 5 – Tabela 5 – Composição dos 15 traços de argamassa.	22
Tabela 6 – Propriedades físicas e caracterização das areias natural e artificial.	23
Tabela 7 – Caracterização cimento Portland e do biochar de bambu.	24
Tabela 8 – Aderência à tração com classificação das formas de ruptura e tensão.	25
Tabela 9 – Resistência à compressão: Argamassas de revestimento.	26
Tabela 9.1 –ANOVA para a resistência à compressão das argamassas de revestimento.	26
Tabela 10 – Resistência à compressão referentes aos 15 traços de argamassa.	29
Tabela 10.1 –ANOVA para a resistência à compressão dos 15 traços de argamassa.	31
Tabela 11 –ANOVA para absorção de água por capilaridade.	32
Tabela 11.1 – Resultados do ensaio de absorção de água por capilaridade.	32

## **LISTA DE GRÁFICOS**

Gráfico 1 – Resistência à compressão das argamassas de revestimento.	27
Gráfico 2 – Resistência à compressão referentes aos 15 traços de argamassa.	28

## LISTA DE ABREVEATURAS E SIGLAS

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas

ANOVA – Analysis of Variance (Análise de Variância)

B – Boro

Ca – Cálcio

$\text{CaCO}_3$  – Carbonato de cálcio

C-S-H – Silicato de cálcio hidratado

$\text{CaO}$  – Óxido de cálcio

$\text{CO}_2$  – Dióxido de carbono

CO – Carbono orgânico

CPV-ARI – Cimento Portland de Alta Resistência Inicial

CPII-F-32 – Cimento Portland Composto com fíler

Cu – Cobre

Fe – Ferro

$\text{Fe}_2\text{O}_3$  – Óxido de ferro

GEE – Gases de Efeito Estufa

$\text{K}_2\text{O}$  – Óxido de potássio

LOI – Loss on Ignition (Perda ao fogo)

Mg – Magnésio

$\text{MgO}$  – Óxido de magnésio

Mn – Manganês

MO – Matéria orgânica

Na – Sódio

NBR – Norma Brasileira

ODS – Objetivos de Desenvolvimento Sustentável

USP/ESALQ – Universidade de São Paulo: Escola Superior de Agricultura - Luiz de Queiroz

RM – Resíduo mineral

RMI – Resíduo mineral insolúvel

RMT – Resíduo mineral total

$\text{SiO}_2$  – Dióxido de silício

SNIC – Sindicato Nacional da Indústria do Cimento

$\text{SO}_3$  – Trióxido de enxofre

## 1. INTRODUÇÃO

A construção civil desempenha papel fundamental no desenvolvimento socioeconômico das nações, sendo responsável por gerar infraestrutura, habitação e serviços essenciais à sociedade. No entanto, esse setor é também um dos maiores consumidores de recursos naturais e energia, além de ser um dos principais emissores de gases de efeito estufa (GEE), especialmente o dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>). De acordo com o Sindicato Nacional da Indústria do Cimento (SNIC, 2019), a produção de cimento responde por aproximadamente 5% a 7% das emissões globais de CO<sub>2</sub>, configurando-se como um dos processos industriais mais poluentes da atualidade (LABIANCA *et al.* 2024).

O impacto ambiental gerado pela indústria da construção está associado à extração intensiva de matérias-primas, como calcário e argila, e ao elevado consumo de energia térmica e elétrica durante a produção do clínquer, componente essencial do cimento. Além disso, o uso extensivo de areia natural, especialmente a areia lavada de rio, acarreta a degradação de ecossistemas fluviais, redução da biodiversidade aquática e desequilíbrios hidrológicos. Tais consequências exigem a adoção de soluções sustentáveis sem comprometer o desempenho técnico dos materiais e sistemas construtivos (HUSSAIN *et al.* 2022).

Nesse contexto, destaca-se a crescente busca por materiais alternativos e tecnologias de baixo carbono, capazes de reduzir o impacto ambiental dos insumos tradicionais da construção. Entre as aplicações destaca-se o biochar, um produto carbonáceo obtido por meio da pirólise controlada de biomassa vegetal, como o bambu. Além de contribuir para o reaproveitamento de resíduos orgânicos, o biochar apresenta propriedades pozolânicas que permitem a utilização como substituto parcial do cimento Portland. Pesquisas como as de Frías *et al.* (2012), Rodier *et al.* (2017) e Villar-Cociña *et al.* (2010) indicam que o biochar pode melhorar a resistência mecânica, a durabilidade e a densidade das argamassas, ao mesmo tempo que contribui para a redução das emissões de CO<sub>2</sub> e para o sequestro de carbono.

Outro material promissor no contexto da sustentabilidade é a areia artificial, proveniente da britagem de rochas e de resíduos da indústria mineral. A utilização como substituta da areia lavada de rio vem sendo estudada, apresentando vantagens técnicas, econômicas e ambientais. Segundo Silva *et al.* (2018), a areia artificial pode conferir às argamassas propriedades granulométricas mais uniformes, com boa trabalhabilidade e desempenho compatível ou superior ao das misturas convencionais, além de reduzir a pressão sobre os ecossistemas aquáticos. A substituição parcial do cimento e da areia natural por materiais sustentáveis representa uma abordagem estratégica para mitigação de impactos ambientais.

No entanto, para que essas soluções possam ser implementadas de forma segura e eficiente, é fundamental compreender o comportamento físico-mecânico e o desempenho das argamassas modificadas, especialmente no que se refere à resistência à compressão, aderência ao substrato e absorção de água por capilaridade. Apesar dos avanços significativos nas pesquisas que investigam a substituição parcial do cimento por biochar e a utilização da areia artificial como substituto da areia natural, a literatura ainda apresenta um número limitado de estudos que analisam a combinação simultânea desses dois substitutos em argamassas de revestimento. A maioria dos trabalhos disponíveis aborda esses materiais de forma isolada, focando nos efeitos individuais, no desempenho técnico e ambiental dos materiais.

A ausência de pesquisas que integrem o uso simultâneo de biochar e areia artificial evidencia uma lacuna científica significativa, impedindo a plena compreensão dos efeitos combinados desses substitutos. Dessa forma, este estudo visa preencher essa lacuna, avaliando conjuntamente os impactos da substituição parcial do cimento por biochar de bambu e da areia lavada de rio por areia artificial, com o intuito de ampliar as possibilidades de desenvolvimento de materiais de construção mais sustentáveis e inovadores.

## 2. REVISÃO DE LITERATURA

A construção civil tem buscado cada vez mais materiais sustentáveis para reduzir o impacto ambiental e garantir a qualidade das obras. Duas alternativas que vêm ganhando destaque são o biochar, um material feito pela queima controlada de resíduos vegetais, e a areia artificial produzida a partir da britagem de pedras, que substitui a areia extraída dos rios. Tais materiais ajudam a diminuir a extração de recursos naturais e podem melhorar o desempenho das argamassas. Por isso, é interessante investigar como o uso conjunto do biochar e da areia artificial pode contribuir para criar materiais mais sustentáveis e eficientes nesse setor.

### 2.1 Construção civil e aquecimento global

A busca por soluções sustentáveis na construção civil não se limita apenas à utilização de novos materiais, mas também envolve a inovação nos processos construtivos, no design e na forma como os recursos são utilizados. A construção sustentável visa reduzir os impactos ambientais ao longo de todo o ciclo de vida da edificação, desde a extração de materiais até a demolição. No caso das argamassas, a incorporação de insumos alternativos como o biochar de bambu e a areia artificial pode contribuir para a sustentabilidade do setor, oferecendo materiais com menor impacto ambiental e reduzida pegada de carbono (MOIR *et al.*, 2003).

Além disso, o avanço da tecnologia de materiais e a adoção de processos produtivos sustentáveis são essenciais para consolidar práticas construtivas de baixo impacto. A incorporação de biomateriais, como o biochar de bambu, e o aproveitamento dos resíduos provenientes do processo de britagem para a produção de areia artificial representam inovações tecnológicas capazes de transformar a construção civil, promovendo soluções mais eficientes e ambientalmente sustentáveis (JARAMILLO *et al.*, 2012).

No contexto brasileiro, o bambu se destaca como uma biomassa amplamente disponível e renovável, com grande potencial para aplicações sustentáveis na construção civil. A elevada taxa de crescimento, aliada a propriedades físico-químicas favoráveis, torna-o uma matéria-prima estratégica para a produção de biochar por meio de pirólise controlada. Este subproduto pode atuar como substituto parcial do cimento Portland, contribuindo para a redução da pegada de carbono dos compósitos cimentícios (LIMA *et al.*, 2023; MARTINS *et al.*, 2022). No entanto, é importante ressaltar que o biochar nem sempre apresenta atividade pozolânica significativa, exigindo avaliação criteriosa de suas propriedades antes da aplicação.

Simultaneamente, a crescente escassez e os impactos associados à exploração da areia natural incentivam a adoção de agregados alternativos. A areia artificial, proveniente da britagem de rochas e de resíduos da indústria mineral, tem se mostrado uma alternativa técnica e ambientalmente viável. Sua aplicação contribui para a preservação dos ecossistemas fluviais e oferece características granulométricas adequadas para a produção de argamassas com bom desempenho mecânico e trabalhabilidade (SILVA *et al.*, 2018; PEREIRA *et al.*, 2021).

Dessa forma, esta pesquisa está alinhada com os Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS) propostos pela Agenda 2030 da Organização das Nações Unidas, especialmente os ODS 9 (Indústria, inovação e infraestrutura), ODS 11 (Cidades e comunidades sustentáveis) e ODS 12 (Consumo e produção responsáveis) promovendo o desenvolvimento de soluções inovadoras para a sustentabilidade na construção civil.

## 2.2 Biochar como material cimentício suplementar

O biochar é um material poroso e estável obtido pela pirólise de materiais orgânicos — como madeira, resíduos agrícolas e biomassa — em ambiente com ausência de oxigênio. Esse processo térmico impede a combustão completa da matéria, reduzindo a emissão de poluentes atmosféricos. Diferentemente da combustão convencional, que libera grandes quantidades de dióxido de carbono, a pirólise converte os resíduos vegetais em carbono sólido, aplicável tanto em solos quanto em materiais de construção (LEWIS *et al.*, 2015).

Entre as matérias-primas utilizadas, o bambu se destaca por ser uma planta de rápido crescimento, alta produtividade e elevada capacidade de renovação. Esses atributos o tornam um recurso vegetal sustentável e promissor para a construção civil (GAUSS, 2020; LIMA *et al.*, 2023). No Brasil, o uso do bambu é tradicionalmente associado a estruturas provisórias, painéis e elementos arquitetônicos, devido à resistência mecânica, flexibilidade e baixo impacto ambiental em comparação a materiais convencionais (SANTOS *et al.*, 2021).

Além do emprego direto da planta, resíduos de bambu vêm sendo aproveitados na produção de cinzas com propriedades pozolânicas. Ferreira *et al.* (2019) observaram ganhos de resistência e durabilidade em concretos com adição dessas cinzas, enquanto Moraes *et al.* (2020) identificaram ganhos de resistência em argamassas. Kumar *et al.* (2017) confirmaram, por meio de análises químicas e mineralógicas, a atividade pozolânica desses subprodutos.

Mais recentemente, o foco das pesquisas voltou-se para o biochar de bambu, obtido pela pirólise controlada de sua biomassa. Devido à estrutura porosa e à composição rica em carbono estável, o biochar apresenta potencial para atuar como material pozolânico, reagindo com o hidróxido de cálcio proveniente da hidratação do cimento Portland (RODIER *et al.*, 2017; VILLAR-COCIÑA *et al.*, 2010). Essa reação contribui para a formação de compostos cimentantes adicionais, aumentando a densidade e desempenho mecânico das argamassas.

Estudos como os de Frías *et al.* (2012) e Rodier *et al.* (2017) apontam que a substituição parcial do cimento por biochar de bambu pode manter ou melhorar propriedades mecânicas, como resistência à compressão, aderência e durabilidade, desde que aplicada em proporções adequadas. Em teores de substituição de até 5%, foram observadas melhorias na microestrutura e no desempenho mecânico, além de significativa redução das emissões de CO<sub>2</sub> associadas à produção do cimento Portland.

De modo geral, a principal vantagem do uso do biochar está na expressiva redução das emissões de CO<sub>2</sub>, visto que a produção de cimento Portland envolve a calcinação do calcário a altas temperaturas, processo altamente emissor de GEE. Em contrapartida, a produção de biochar apresenta menor intensidade emissiva e, quando associada a fontes renováveis de energia, pode ser considerada praticamente neutra em carbono (BROWN *et al.*, 2012).

Outros benefícios incluem o reaproveitamento de resíduos orgânicos, evitando descarte inadequado e fortalecendo a economia circular (MOIR, 2003; JARAMILLO, 2012), bem como a melhoria das propriedades térmicas e de isolamento das argamassas, devido à estrutura porosa do biochar (FRÍAS *et al.*, 2012; RODIER *et al.*, 2017). O Quadro 1 resume as principais vantagens e desvantagens da utilização do biochar como substituto parcial do cimento.

Quadro 1 – Vantagens e desvantagens da substituição parcial do cimento por biochar.

<b>VANTAGENS</b>	
Redução das emissões de CO <sub>2</sub> .	Brown <i>et al.</i> (2012).
Aproveitamento de resíduos orgânicos.	Moir (2003); Jaramillo (2012).
Melhoria nas propriedades térmicas e de isolamento	Frías <i>et al.</i> (2012).
Propriedades pozolânicas.	Rodier <i>et al.</i> (2017).
<b>DESVANTAGENS</b>	
Redução na resistência inicial.	Frías <i>et al.</i> (2012).
Variabilidade nas propriedades do biochar.	Jaramillo (2012).
Disponibilidade limitada.	Brown <i>et al.</i> (2012).
Necessidade de estudos complementares.	Singh <i>et al.</i> (2007).
Falta de regulamentação e aceitação no mercado.	SNIC (2019).

Fonte: Autor, (2025).

Contudo, há limitações. Entre elas, destacam-se: a possível redução da resistência inicial em teores elevados de substituição, a variabilidade nas propriedades do biochar em função da biomassa de origem e das condições de pirólise, a disponibilidade restrita em algumas regiões e a ausência de normas técnicas específicas que regulamentem o uso (Frías *et al.*, 2012; Jaramillo, 2012; Brown *et al.*, 2012; SNIC, 2019). Esses desafios reforçam a necessidade de estudos complementares para consolidar o biochar de bambu como alternativa viável na construção civil, conciliando desempenho técnico e benefícios ambientais.

### 2.3 Argamassa de revestimento

Erba (2022) investigou diferentes proporções de substituição da areia natural por pó de pedra britado em argamassas de revestimento, observando que teores de até 20% são adequados para aplicação externa, enquanto substituições de até 50% são viáveis para aplicações internas em áreas secas. Os resultados indicaram a manutenção do desempenho mecânico, da trabalhabilidade e da coesão da mistura, desde que os teores de substituição sejam controlados. De modo semelhante, Silva (2006) avaliou argamassas compostas por cimento, cal hidratada e areia artificial de rocha calcária britada. Os ensaios revelaram melhorias nos parâmetros de resistência à compressão e à aderência, redução na permeabilidade das argamassas, embora com maior propensão à fissuração quando o conteúdo de finos era elevado.

Silva *et al.* (2016) também demonstraram que as características granulométricas da areia artificial, sobretudo a forma dos grãos e o teor de material fino, influenciam diretamente as propriedades no estado fresco e endurecido das argamassas. Ajustes adequados na composição podem assegurar boa trabalhabilidade e desempenho mecânico compatível com os requisitos das normas técnicas.

A literatura recente, portanto, indica que o uso de areia artificial em argamassas de revestimento não apenas reduz a dependência da areia natural, mas também contribui para a sustentabilidade ambiental da construção civil, mantendo a eficiência técnica das misturas. As argamassas constituem materiais fundamentais na construção civil, empregados em revestimentos, assentamento de blocos e diversas outras aplicações. A composição tradicional inclui cimento, cal, areia e água. A substituição parcial de componentes convencionais por materiais alternativos tem sido amplamente investigada como estratégia para reduzir o impacto ambiental, preservando o desempenho das argamassas (YANG; WANG, 2021).

Frías *et al.* (2012) ressaltam que, apesar da possível redução da resistência inicial associada a materiais pozolânicos, há ganho progressivo ao longo do tempo, decorrente de reações químicas favorecidas por determinados tipos de biochar, que contribuem para a durabilidade do material. Além disso, a elevada porosidade do biochar confere melhor isolamento térmico e acústico às edificações (RODIER *et al.*, 2017).

Paralelamente, a substituição da areia lavada de rio por areia artificial tem apresentado efeitos positivos nas propriedades físicas e mecânicas das argamassas. A granulometria controlada da areia artificial favorece maior aderência entre os componentes da mistura, além de aprimorar a resistência ao desgaste e à abrasão (SANTOS *et al.*, 2018). Silva *et al.* (2018) destacam que a utilização promove argamassas com melhor trabalhabilidade e maior uniformidade no resultado.

## 2.4 Efeitos do Biochar nas Propriedades das Argamassas

A hidratação do cimento Portland inicia-se com a adição de água, desencadeando reações químicas entre seus compostos, principalmente o silicato tricálcico ( $C_3S$ ). Esse composto reage formando o gel C-S-H e liberando hidróxido de cálcio ( $Ca(OH)_2$ ), num processo exotérmico que libera calor e promove o ganho gradual de resistência ao longo do tempo (TAYLOR, 1997). O tempo de pega e o tempo de cura são parâmetros essenciais que influenciam diretamente a resistência e a durabilidade da argamassa, determinando a adequação para diferentes aplicações.

A substituição parcial do cimento por biochar afeta esse processo, pois o biochar é composto majoritariamente por carbono e possui menor teor de sílica e minerais reativos, apresentando atividade pozolânica limitada (RODIER *et al.*, 2017). No entanto, a estrutura porosa e alta área superficial favorecem a absorção e retenção de água, e pode auxiliar a hidratação em misturas com menor teor de cimento, ainda que de forma mais lenta.

Villar-Cociña *et al.* (2010) destacam que o biochar, em pequenas quantidades, pode formar compostos semelhantes ao gel C-S-H ao reagir com o hidróxido de cálcio, contribuindo para o desenvolvimento da resistência. Todavia, substituições elevadas tendem a retardar a hidratação inicial, prejudicando o ganho precoce de resistência. Além disso, o desempenho do biochar varia, conforme a biomassa utilizada e as condições de pirólise, exigindo controle rigoroso na aplicação em teores adequados.

A hidratação de argamassas contendo cimento, biochar e areia artificial é um processo complexo e influenciado por diversos fatores, como a proporção de cimento substituído, a qualidade do biochar e a origem da areia artificial. A substituição do cimento por biochar pode retardar a hidratação por causa da menor reatividade do material, mas também pode melhorar a retenção de água e as propriedades mecânicas a longo prazo. Por sua vez, a areia artificial pode modificar as propriedades físicas da mistura, afetando a consistência e a adesão entre a pasta de cimento e os agregados.

### 3. JUSTIFICATIVA

A crescente demanda por práticas construtivas sustentáveis tem impulsionado a busca por soluções capazes de conciliar desempenho técnico, viabilidade econômica e redução dos impactos ambientais. No setor da construção civil, o uso intensivo de recursos tradicionais, como o cimento Portland e a areia lavada de rio, está associado a sérios problemas ambientais, incluindo altas emissões de gases de efeito estufa, degradação de ecossistemas aquáticos e esgotamento de recursos naturais não renováveis.

Neste contexto, a substituição parcial desses materiais por alternativas sustentáveis, como o biochar de bambu e a areia artificial, representa uma abordagem inovadora e promissora. O biochar, obtido por meio da pirólise controlada da biomassa vegetal, contribui para o reaproveitamento de resíduos orgânicos e a redução das emissões de CO<sub>2</sub> na produção de argamassas, além de apresentar propriedades que potencialmente melhoram o desempenho mecânico e a durabilidade do material. A areia artificial, proveniente da britagem de resíduos minerais, oferece maior controle granulométrico e reduz a pressão sobre os ecossistemas fluviais, ao substituir a extração predatória da areia natural.

Apesar dos avanços individuais no uso desses materiais, existe uma lacuna significativa na literatura quanto à avaliação conjunta dos efeitos da substituição simultânea do cimento por biochar e da areia natural por areia artificial em argamassas de revestimento. Essa falta de estudos integrados limita a compreensão dos possíveis efeitos dessas combinações.

Portanto, o presente estudo justifica-se pela necessidade de preencher essa lacuna, investigando o comportamento das argamassas formuladas com esses dois materiais sustentáveis, contribuindo para o avanço do conhecimento técnico-científico e para o desenvolvimento de práticas construtivas de baixo impacto ambiental.

Além disso, esta pesquisa está alinhada aos Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS) da Organização das Nações Unidas, especialmente:

- ODS 9 (Indústria, inovação e infraestrutura), ao promover inovações tecnológicas sustentáveis na construção civil;
- ODS 11 (Cidades e comunidades sustentáveis), ao incentivar práticas construtivas que minimizem os impactos ambientais urbanos;
- ODS 12 (Consumo e produção responsáveis), ao fomentar a utilização eficiente e sustentável dos recursos naturais;
- ODS 13 (Ação contra a mudança global do clima), por contribuir para a redução das emissões de gases de efeito estufa no setor da construção.

Com isso, espera-se que os resultados obtidos possam apoiar a implementação de soluções técnicas viáveis e ambientalmente responsáveis, fomentando a sustentabilidade no setor da construção civil.

## **4. OBJETIVOS**

### **4.1. Objetivo Geral**

Avaliar o uso do biochar do bambu e da areia artificial como substitutos parciais, respectivamente, do cimento e da areia lavada de rio em argamassas de revestimento.

### **4.2. Objetivos específicos**

- I. Avaliar o efeito da incorporação de biochar de bambu e areia artificial nas propriedades mecânicas das argamassas, com ênfase na resistência à compressão e na aderência à tração, comparando os resultados com argamassas convencionais.
- II. Determinar a absorção de água por capilaridade das argamassas produzidas com biochar do bambu e areia artificial e compará-las com argamassas convencionais.

## 5. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- BROWN, R. A.; CARLSON, J. J.; KUNZ, M. M. Biochar: an emerging solution for climate change and soil degradation. **Environmental Science & Technology**, v. 46, n. 1, p. 45–56, 2012.
- COSTA, R. S.; OLIVEIRA, R. A.; MENEZES, P. A. Impactos ambientais da extração de areia em rios brasileiros. **Revista Brasileira de Geografia Física**, v. 14, n. 3, p. 1230–1248, 2021.
- ERBA, D. Estudo da viabilidade técnica da substituição de areia natural por pó de pedra em argamassas de revestimento. **Revista de Engenharia Civil**, v. 28, n. 2, p. 75–82, 2022.
- FERREIRA, T. R.; ARAÚJO, E. P.; MOURA, M. R. Utilização das cinzas de folhas de bambu como adição pozolânica em concretos. **Construindo**, v. 11, n. 1, p. 32–42, 2019.
- FRÍAS, M. et al. Characterisation of bamboo leaf ash as pozzolanic material for use in cement-based materials. **Construction and Building Materials**, v. 27, n. 1, p. 118–122, 2012.
- GAO, J. et al. Cement production and CO<sub>2</sub> emissions: an updated global analysis. **Journal of Cleaner Production**, v. 405, 2023.
- GAUSS, D. Potencial do bambu como recurso sustentável na construção civil. *Revista Científica de Engenharia Sustentável*, v. 9, n. 1, p. 49–60, 2020.
- HUSSAIN, M. et al. A review of sustainable alternatives in the construction industry: recent advances and challenges. **Sustainability**, v. 14, n. 12, p. 10235, 2022.
- JARAMILLO, M. L.; MORENO, F. S. Biochar e seu uso na construção civil: perspectivas e desafios. **Revista Tecnológica**, v. 21, n. 3, p. 88–95, 2012.
- KUMAR, A. et al. Pozzolanic reactivity of bamboo leaf ash in blended cement pastes. **Journal of Materials in Civil Engineering**, v. 29, n. 4, 2017.
- LABIANCA, R. et al. Emissões de CO<sub>2</sub> na indústria do cimento e estratégias de mitigação. **Revista Engenharia Sustentável**, v. 15, n. 2, p. 102–117, 2024.
- LEWIS, J.; HARVEY, O.; MEYER, S. Biochar production and applications in building materials. **Green Building Materials**, v. 7, n. 1, p. 55–68, 2015.
- LIMA, M. S.; OLIVEIRA, J. C.; RIBEIRO, T. B. Caracterização do biochar de bambu para aplicações na construção civil. **Revista Matéria**, v. 28, n. 2, p. 35–44, 2023.
- MARTINS, F. A.; SANTOS, L. R.; OLIVEIRA, R. M. Avaliação de resíduos de bambu para produção de biochar. **Revista Brasileira de Engenharia e Sustentabilidade**, v. 3, n. 1, p. 15–24, 2022.
- MOIR, G. K. Pozzolanic materials: a critical review. **Cement and Concrete Research**, v. 33, n. 2, p. 309–317, 2003.

- MORAES, C. P.; MENDES, D. M. Substituição de cimento por cinzas de bambu em argamassas: propriedades físicas e mecânicas. **Revista Construção Sustentável**, v. 8, n. 1, p. 21–29, 2020.
- PEREIRA, T. F. et al. Potencial da areia artificial como substituto da areia natural em argamassas. **Revista de Engenharia Civil e Ambiental**, v. 11, n. 4, p. 345–352, 2021.
- RODIER, L. et al. Biochar in cementitious materials: an overview. **Cement and Concrete Composites**, v. 83, p. 212–222, 2017.
- SANTOS, M. T. et al. Aplicações estruturais do bambu: uma revisão. **Revista Brasileira de Engenharia Natural**, v. 5, n. 2, p. 42–50, 2021.
- SANTOS, R. A.; FERREIRA, T. R.; LIMA, M. A. Influência da areia artificial nas propriedades de argamassas. **Revista de Engenharia Civil Aplicada**, v. 10, n. 3, p. 89–97, 2018.
- SILVA, F. C. **Argamassas com areia artificial de rocha calcária britada: propriedades físicas e mecânicas**. 2006. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2006.
- SILVA, M. A. et al. Influência da granulometria da areia artificial em argamassas de revestimento. **Revista Materiais e Construção**, v. 23, n. 1, p. 55–66, 2016.
- SILVA, P. H. F. et al. Desempenho de argamassas com substituição da areia natural por areia artificial. **Revista Engenharia Civil e Ambiente**, v. 15, n. 2, p. 67–76, 2018.
- SILVA, R. T. et al. Impactos ambientais da extração de areia natural e alternativas sustentáveis. **Revista de Engenharia Ambiental**, v. 19, n. 1, p. 13–23, 2022.
- SINGH, N. B. et al. Development of cementitious materials with industrial wastes: a review. **Construction and Building Materials**, v. 21, p. 1583–1591, 2007.
- SNIC – SINDICATO NACIONAL DA INDÚSTRIA DO CIMENTO. **Cimento e sustentabilidade**. Brasília: SNIC, 2019.
- TAYLOR, H. F. W. **Cement chemistry**. 2. ed. London: Thomas Telford, 1997.
- VILLAR-COCIÑA, E. et al. Pozzolanic behavior of bamboo leaf ash: kinetics and reaction mechanism. **Applied Clay Science**, v. 50, n. 3, p. 507–512, 2010.
- YANG, J.; WANG, Y. Sustainable mortars: a review on mechanical properties and environmental impacts. **Construction and Building Materials**, v. 293, 2021.

## 6. CAPÍTULO 1 – ARTIGO 1

# **ADOÇÃO DE MATERIAIS SUSTENTÁVEIS NA CONSTRUÇÃO CIVIL: IMPACTO DO BIOCHAR DE BAMBU E AREIA ARTIFICIAL NO DESEMPENHO DE ARGAMASSAS**

Whellysonn Viana Tamasauskas

Mestrando Engenharia Aplicada e Sustentabilidade

Instituto Federal Goiano, Campus Rio Verde

Programa de Pós-graduação em Engenharia Aplicada e Sustentabilidade

[whellysonn.viana@estudante.ifgoiano.edu.br](mailto:whellysonn.viana@estudante.ifgoiano.edu.br)

Michell Macêdo Alves

Prof. Dr. do Instituto Federal de Goiás, Campus Rio Verde

Prof. Orientador do Programa de Pós-graduação em Engenharia Aplicada e Sustentabilidade

[michell.macedo@ifgoiano.edu.br](mailto:michell.macedo@ifgoiano.edu.br)

Alex Neves Junior

Prof. D.Sc. da Universidade Federal de Mato - Departamento de Engenharia Civil - Cuiabá - MT – Brasil

Prof. Coorientador do Programa de Pós-graduação em Engenharia Aplicada e Sustentabilidade

[Alex.junior@ufmt.br](mailto:Alex.junior@ufmt.br)

## RESUMO

A construção civil é uma das principais responsáveis pelas emissões de CO<sub>2</sub> e pelo consumo intensivo de recursos naturais, especialmente em função da produção de cimento Portland e da extração de agregados naturais. Com o objetivo de mitigar esses impactos, o presente estudo avaliou a viabilidade técnica e ambiental da substituição parcial do cimento por biochar de bambu e da areia natural por areia artificial proveniente de brita, em argamassas de revestimento. Para a condução da pesquisa, foram desenvolvidos dois métodos experimentais. No primeiro, foram formulados cinco traços de argamassa com substituições simultâneas da areia natural por areia artificial e do cimento por biochar, nas proporções de 0%, 3%, 5%, 7% e 10%, em massa. No segundo método, mantiveram-se essas proporções de substituição, aplicadas a três diferentes composições de agregados: apenas areia natural, apenas areia artificial e uma mistura de ambos. Nesse segundo experimento, a substituição do cimento por biochar foi realizada somente a partir da proporção de 3%, sendo o traço com 0% utilizado como referência, sem adição de biochar, totalizando quinze traços experimentais, possibilitando a análise dos efeitos isolados e combinados das substituições sobre o desempenho das argamassas. Os corpos de prova foram submetidos aos ensaios de resistência à compressão (NBR 13279:2020) e de absorção de água por capilaridade (NBR 9779:2012). Também foi realizado o ensaio de aderência à tração (NBR 13528:2010). Os resultados indicaram que teores de substituição de até 7% preservam ou aprimoram as propriedades mecânicas e de durabilidade das argamassas, sendo o traço com 5% o que apresentou o melhor equilíbrio entre resistência e absorção. Já os ensaios de aderência à tração demonstraram que as substituições de 3% e 5% atendem aos requisitos normativos. Conclui-se que a substituição controlada por biochar e areia artificial é tecnicamente viável, representando uma estratégia promissora para a redução da pegada ambiental da construção civil, sem comprometer o desempenho dos revestimentos.

**Palavras-chave:** Biochar de bambu; Areia artificial; Argamassa; Sustentabilidade; Materiais alternativos.

## ABSTRACT

The construction industry is one of the main contributors to CO<sub>2</sub> emissions and the intensive consumption of natural resources, particularly due to the production of Portland cement and the extraction of natural aggregates. Aiming to mitigate these impacts, the present study evaluated the technical and environmental feasibility of partially replacing cement by bamboo biochar and natural sand by manufactured sand derived from crushed stone, in rendering mortars. To carry out the study, two experimental approaches were developed. In the first, five mortar mixes were formulated with simultaneous substitutions of natural sand by manufactured sand and cement by biochar, at levels of 0%, 3%, 5%, 7%, and 10% by mass. In the second method, the same substitution levels were applied to three different aggregate compositions: natural sand only, manufactured sand only, and a blend of both. In this second experiment, cement replacement by biochar was performed only from the 3% level onward, with the 0% mix used as a reference, without the addition of biochar. In total, fifteen experimental mixes were prepared, allowing the analysis of the isolated and combined effects of the substitutions on mortar performance. The specimens were subjected to compressive strength testing (NBR 13279:2020) and water absorption by capillarity (NBR 9779:2012). The bond strength test (NBR 13528:2010) was also conducted. The results indicated that replacement levels of up to 7% preserved or improved the mechanical and durability properties of the mortars, with the 5% mix showing the best balance between strength and absorption. The bond strength tests demonstrated that the 3% and 5% replacements met the normative requirements. It is concluded that the controlled substitution of cement and natural sand by respectively biochar and manufactured sand is technically feasible and represents a promising strategy for reducing the environmental footprint of the construction sector without compromising the performance of mortar coatings.

**Keywords:** Bamboo biochar. Artificial sand. Mortar. Sustainability. Alternative materials.

## 6.1. Introdução

A construção civil é um dos setores mais relevantes da economia global, sendo o cimento Portland (CP) o principal material empregado. No entanto, a produção de cimento apresenta elevado impacto ambiental, sendo responsável por aproximadamente 5% a 7% das emissões globais de dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>), contribuindo diretamente para o aquecimento global e para as mudanças climáticas. Essa realidade tem incentivado a busca por soluções que possibilitem a redução do uso de cimento e, consequentemente, das emissões associadas em sua produção (DAVIS *et al.*, 2015; HUA *et al.*, 2017; KIM *et al.*, 2018; ZHANG *et al.*, 2014).

Uma das alternativas mais promissoras é o uso do biochar, um material carbonáceo obtido a partir da pirólise de biomassa, como resíduos agrícolas e florestais. A pirólise é um processo de decomposição térmica realizado em ambiente com baixa presença de oxigênio, o que impede a combustão completa e, portanto, evita a emissão direta de CO<sub>2</sub> na atmosfera. Além disso, esse processo converte o carbono presente na biomassa em formas estáveis, que permanecem retidas na estrutura do biochar, atuando como mecanismo de sequestro de carbono (MENDONÇA *et al.*, 2018; OLIVEIRA *et al.*, 2020; YUAN *et al.*, 2016; ZHAO *et al.*, 2019).

Estudos indicam que o biochar pode substituir parcialmente o cimento Portland em concretos e argamassas, contribuindo para a redução da pegada de carbono da construção civil (MENDES *et al.*, 2021; FRÍAS *et al.*, 2012). Alguns tipos de biochar apresentam propriedades pozolânicas, reagindo com o hidróxido de cálcio liberado durante a hidratação do cimento e formando compostos adicionais do tipo C-S-H, que aumentam a resistência e a durabilidade da matriz cimentícia (RODIER *et al.*, 2017; VILLAR-COCIÑA *et al.*, 2010).

Segundo Costa *et al.*, (2020) o biochar de bambu destaca-se pela elevada renovabilidade, uma vez que o bambu apresenta rápido crescimento e capacidade de rebrote após o corte, além de possuir baixo impacto ambiental em sua produção. Essas características o qualificam como uma alternativa tecnicamente viável para a substituição parcial do cimento em composições voltadas à construção sustentável.

Além da substituição do cimento, outro desafio relevante enfrentado pelo setor da construção civil refere-se à escassez de areia natural, amplamente utilizada em construções e materiais cimentícios. A extração desse insumo, sobretudo em leitos fluviais, tem ocasionado significativos impactos ambientais, como a degradação de ecossistemas e a redução da biodiversidade local. Nesse contexto, a utilização de areia artificial, proveniente da britagem de rochas, apresenta-se como alternativa viável para mitigar os impactos ambientais decorrentes da extração de areia natural (ISHIKAWA; OLIVEIRA, 2012; OLIVEIRA *et al.*, 2012).

Faria *et al.*, 2019 demonstraram que a areia artificial pode melhorar a resistência das argamassas, atendendo aos requisitos técnicos estabelecidos por normas, como a NBR 13281 (2005), além de representar uma alternativa mais sustentável e economicamente eficiente.

Dentre os materiais utilizados em edificações, a argamassa de revestimento se destaca pela elevada exigência de desempenho, especialmente no que se refere à aderência, resistência à compressão e durabilidade, características fundamentais para garantir a integridade e a longevidade das superfícies aplicadas. O uso de materiais alternativos, como o biochar e a areia artificial, na formulação de argamassas pode proporcionar ganhos expressivos em termos de sustentabilidade e desempenho mecânico. Pesquisas como as de Silva *et al.*, (2019) e Vidal *et al.*, (2017) indicam que, ao substituir parcialmente o cimento e a areia natural, é possível obter argamassas com propriedades mecânicas comparáveis às convencionais, ao mesmo tempo em que se reduz o impacto ambiental associado à atividade construtiva.

Villar-Cociña *et al.*, (2010) ressaltam que o uso de matérias-primas renováveis, como o bambu, na produção de biochar representa oportunidade relevante para a substituição do cimento, devido à abundância geográfica e produtividade agrícola. Essa abordagem, alinhada aos princípios da economia circular, favorece o reaproveitamento de resíduos e o uso de materiais locais, promovendo uma construção civil mais sustentável e menos dependente de recursos não renováveis.

Acrescido destas vantagens, é importante destacar que a combinação do biochar de bambu com areia artificial, embora promissora, ainda exige avaliação técnica e prática. Segundo Silva *et al.*, (2021) propriedades como resistência à compressão e aderência devem ser cuidadosamente analisadas para assegurar a viabilidade dessas substituições no mercado da construção. Frías *et al.*, (2012) também enfatizam a importância de testes em condições reais de aplicação, de modo que os resultados laboratoriais sejam replicáveis na realidade das obras.

Diante desse cenário, o presente estudo tem como objetivo avaliar a viabilidade da substituição parcial do cimento Portland por biochar de bambu, e a areia natural por areia artificial, em argamassas de revestimento. Serão analisadas propriedades como resistência à compressão, aderência e absorção de água por capilaridade, com o intuito de verificar a adequação dessas substituições para aplicação em revestimentos externos de alvenaria. A pesquisa pretende contribuir para a redução das emissões de CO<sub>2</sub> e para a promoção de práticas mais sustentáveis no setor da construção civil.

## 6.2. Materiais e métodos

O aglomerante adotado para a realização do ensaio de atividade pozolânica foi o cimento Portland composto CPII-F-32, da marca Ciplan, que apresenta, na formulação, adições minerais como o *filler* carbonático ( $\text{CaCO}_3$ ). A Tabela 1 apresenta a composição química aproximada desse cimento, conforme dados disponibilizados pelo fabricante.

Tabela 1 – Composição química do cimento CPII-F-32.

Componente químico	Símbolo	Faixa de variação (% em massa)
Óxido de cálcio	CaO	60 – 67
Dióxido de silício	$\text{SiO}_2$	18 – 25
Óxido de alumínio	$\text{Al}_2\text{O}_3$	4 – 8
Óxido de ferro	$\text{Fe}_2\text{O}_3$	2 – 5
Óxido de magnésio	MgO	0,5 – 4
Trióxido de enxofre	$\text{SO}_3$	2 – 4
Perda ao fogo	LOI	1 – 4
Álcalis totais	$\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O}$	0,2 – 1
Fíler carbonático	–	até 10

Fonte: (CIPLAN, 2025).

Para a moldagem dos diferentes traços de argamassa, utilizados nos ensaios de resistência à compressão e absorção de água por capilaridade, foi selecionado o cimento CPV-ARI cuja escolha ocorreu em razão da elevada resistência inicial, característica importante para os ensaios laboratoriais que demandam ganho de resistência em menor tempo. A Tabela 2 exibe a composição química, conforme especificado pelo fabricante.

Tabela 2 – Composição química do cimento CPV-ARI.

Componente químico	Concentração (% em massa)
Óxido de cálcio (CaO)	53,74
Dióxido de silício ( $\text{SiO}_2$ )	24,41
Óxido de alumínio ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ )	7,09
Óxido de ferro ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ )	3,02
Óxido de magnésio (MgO)	4,36
Trióxido de enxofre ( $\text{SO}_3$ )	3,28
Perda ao fogo (LOI)	1,82
Resíduo insolúvel	0,79
Álcalis totais ( $\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O}$ )	1,06

Fonte: (CIPLAN, 2025).

O agregado miúdo utilizado neste estudo correspondeu a areia natural convencional, adquirida em comércio local na cidade de Rio Verde – GO, Brasil, atendendo aos requisitos estabelecidos pelas normas técnicas vigentes para uso em argamassas de revestimento. Por outro lado, a areia artificial, foi obtida a partir do processo de britagem de pedregulho (Figura 1a) adquirida na empresa Cristal areia no município de Rio Verde – GO, Brasil, como substituta parcial da areia natural lavada de rio.

Considerando a proposta de investigação de materiais sustentáveis, incorporou-se biochar de bambu como substituto parcial do cimento, fornecido pela empresa Takuatèc Florestal (Figura 1c). Esse material apresenta características promissoras para aplicação em argamassas, principalmente pelo elevado teor de carbono orgânico e resíduo mineral, conferindo potencial de melhoria em propriedades físicas e ambientais do produto. De acordo com o laudo de análise emitido pela ESALQ/USP, a composição química detalhada do biochar está apresentada na Tabela 3, evidenciando os principais elementos que podem influenciar o desempenho das argamassas, como carbono, nitrogênio, fósforo e potássio.

Tabela 3 – Composição química do biochar comercial.

<b>Componente químico</b>	<b>Concentração (% em massa)</b>
Matéria orgânica (MO)	89,88
Carbono orgânico (CO)	49,93
Resíduo mineral total (RMT)	6,79
Resíduo mineral (RM)	4,19
Resíduo mineral insolúvel (RMI)	2,60
Nitrogênio total (N)	0,63
Fósforo total (P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> )	0,39
Potássio total (K <sub>2</sub> O)	1,13
Cálcio total (Ca)	0,16
Magnésio total (Mg)	0,15
Enxofre total (S)	0,03
Cobre total (Cu)	0,001
Ferro total (Fe)	0,256
Manganês total (Mn)	0,01
Zinco total (Zn)	0,003
Boro total (B)	0,001
Sódio total (Na)	0,026

Fonte: Autor, (2025).

A caracterização dos materiais utilizados cimento Portland, areia natural, areia artificial e biochar de bambu foi conduzida com base em normas técnicas aplicáveis, com o objetivo de verificar a compatibilidade das propriedades com os requisitos exigidos para o uso em argamassas de revestimento. Foram empregados os procedimentos descritos na ABNT NBR 13279:2020 para o ensaio de resistência à compressão, na ABNT NBR 9779:2012 para a absorção por capilaridade e na ABNT NBR 13528:2010 para a avaliação da aderência à tração. No caso dos agregados, consideraram-se os critérios estabelecidos na ABNT NBR 7211:2022. A Figura 1 apresenta a comparação visual entre os materiais utilizados nos traços experimentais.

Figura 1 – Principais insumos utilizados nos traços experimentais, sendo;  
a) areia artificial; b) cimento Portland; c) biochar; (da esquerda para a direita).



Fonte: Autor, (2025).

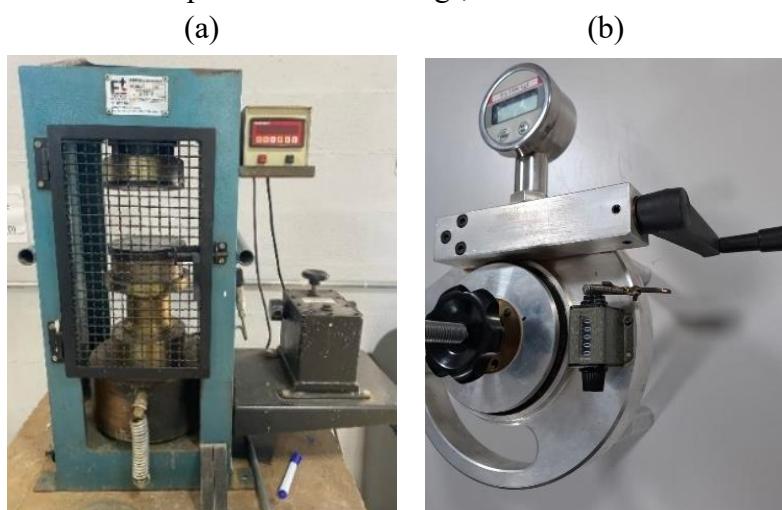
O cimento CPV-ARI foi caracterizado quanto à massa específica e ao índice de finura. A determinação da massa específica foi realizada, conforme a ABNT NBR 16605:2017 – Cimento Portland ou outros materiais em pó – Determinação da massa específica, resultando em 3,07 g/cm<sup>3</sup>. Já o índice de finura foi obtido por meio da ABNT NBR 16372:2015 – Cimento Portland e outros materiais em pó – Determinação da finura pelo método de permeabilidade ao ar (método de Blaine), alcançando o valor de 3.518,18 cm<sup>2</sup>/g. Dessa forma, o cimento utilizado atende às exigências estabelecidas pela ABNT NBR 16697:2018, apresentando, ainda, elevada resistência inicial.

A caracterização do biochar de bambu comercial seguiu os procedimentos estabelecidos pelas normas ABNT NBR 16605:2017 e ABNT NBR 16372:2015, sendo avaliados os parâmetros de massa específica e índice de finura. Além disso, foi realizado o ensaio de atividade pozolânica, conforme a ABNT NBR 5752:2014 – Materiais pozolânicos – Determinação do índice de desempenho com cimento Portland aos 28 dias, utilizando o cimento CPV-ARI e areia natural, conforme especificado pela norma técnica.

A caracterização física dos agregados miúdos incluiu a determinação dos seguintes parâmetros: módulo de finura, diâmetro máximo característico, massa específica, massa unitária compactada e massa unitária solta, conforme as normas técnicas aplicáveis. A composição granulométrica foi determinada segundo a norma NBR 17054 (ABNT, 2022) – Agregados: Determinação da composição granulométrica – Método de ensaio. A massa específica foi obtida, conforme a NBR NM 52 (2009) – Agregado miúdo: Determinação da massa específica e massa específica aparente, enquanto os valores de massa unitária compactada e massa unitária solta foram determinados com base na NBR NM 45 (2006) – Agregados: Determinação da massa unitária e do volume de vazios.

Este estudo adotou uma abordagem experimental e comparativa com o propósito de analisar os efeitos da substituição parcial do cimento Portland por biochar de bambu, bem como da areia natural por areia artificial, em argamassas de revestimento. A caracterização do desempenho mecânico e físico contemplou ensaios de resistência à compressão, resistência de aderência à tração e absorção de água por capilaridade. A instrumentação laboratorial é apresentada na Figura 2, enquanto os procedimentos experimentais são descritos na sequência.

Figura 2 – Instrumentação laboratorial utilizada e finalidade, sendo:  
 (a) Prensa manual modelo FT-02, marca Fortest, aplicada ao ensaio de compressão;  
 (b) Aderímetro com capacidade de 1500 kgf, utilizado no ensaio de aderência.



Fonte: Autor (2025).

A resistência à compressão foi avaliada com base na NBR 13279 (ABNT, 2020) – Argamassas para assentamento e revestimento – Determinação da resistência à tração na flexão e à compressão, e a norma NBR 9779 (ABNT, 2012) – Argamassas e concretos endurecidos – Determinação da absorção de água por capilaridade.

A resistência à aderência foi avaliada de acordo com a NBR 13528 – Revestimento de paredes e tetos de argamassas inorgânicas – Determinação da resistência de aderência à tração (ABNT, 2010). Com base nos resultados obtidos nesses ensaios, foi possível avaliar a eficácia das substituições propostas quanto ao desempenho mecânico e à durabilidade das argamassas.

Para o ensaio de absorção de água por capilaridade, seguiu-se a NBR 9779 (ABNT, 2012) – Argamassas e concretos endurecidos: Determinação da absorção de água por capilaridade. Os corpos de prova foram secos até massa constante em estufa a  $105 \pm 5^\circ\text{C}$ , resfriados em dessecador e, posteriormente, colocados em contato com lâmina d'água de 5 mm de altura, sendo pesados após 72 horas de imersão parcial. A absorção foi calculada com base na variação de massa, permitindo a análise da capacidade de transporte de umidade por ação capilar. O delineamento experimental envolveu dosagens com substituição parcial do cimento por biochar nos teores de 0%, 3%, 5%, 7% e 10%, associadas a três tipos de agregados miúdos: areia natural, artificial e uma mistura proporcional de ambos.

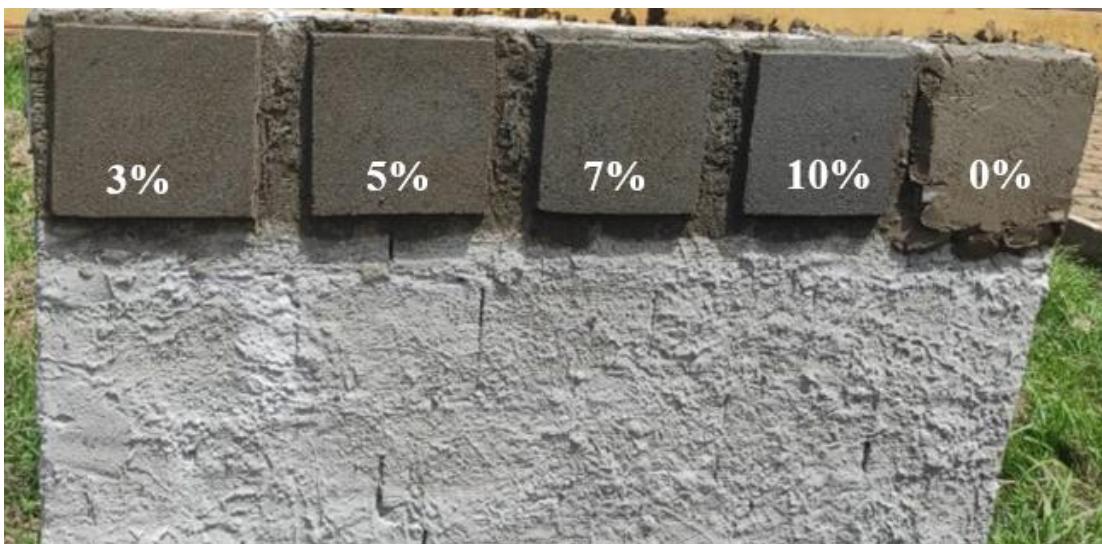
As proporções dos traços de argamassa com substituições parciais de cimento e areia consistiram na preparação de cinco traços distintos de argamassa para revestimento, com substituição parcial do cimento Portland CPII-F-32 por biochar de bambu e da areia natural por areia artificial, nas proporções de 0%, 3%, 5%, 7% e 10%. Para a aplicação prática e posterior análise dos resultados, foi construída uma parede de alvenaria com dimensões de 1,50 m de comprimento por 1,00 m de altura, dividida em cinco áreas de  $0,50 \text{ m} \times 0,50 \text{ m}$  (Figura 3). Cada uma dessas áreas foi revestida com um dos traços experimentais, visando à realização do ensaio de resistência à aderência. As quantidades exatas de materiais utilizadas em cada traço, considerando a área de aplicação de  $0,50 \text{ m} \times 0,50 \text{ m}$ , estão apresentadas na Tabela 4.

Tabela 4 – Composição dos traços para argamassas de revestimento de  $0,50 \text{ m} \times 0,50 \text{ m}$ .

TRAÇO (%)	CIMENTO (kg)	BIOCHAR (kg)	AREIA NATURAL (kg)	AREIA ARTIFICIAL (kg)	ÁREA REBOCADA (cm x cm)	ÁGUA UTILIZADA (mL)
0%	1,300	0,000	8,357	0,000	50 x 50	1725,00
3%	1,261	0,039	8,106	0,251	50 x 50	1500,00
5%	1,235	0,037	7,939	0,418	50 x 50	1500,00
7%	1,209	0,091	7,772	0,585	50 x 50	1650,00
10%	1,170	0,130	7,521	0,836	50 x 50	1700,00

Fonte: Autor (2025).

Figura 3 – Traços de argamassa em parede com substituição de cimento por biochar e areia natural por areia artificial (da esquerda para a direita: 3%, 5%, 7%, 10% e 0%).



Fonte: Autor, (2025).

Para a avaliação da resistência à compressão, foram moldados quatro corpos de prova para cada traço experimental. A dosagem das argamassas seguiu a proporção em massa de 1:6 (cimento: agregado miúdo), em conformidade com as prescrições da NBR 13281 (ABNT, 2005). O delineamento experimental compreendeu os cinco traços: o traço de referência (T1, com 0% de substituição) e os quatro traços (T2 a T5) com teores crescentes de substituição (3%, 5%, 7% e 10%, respectivamente), com o intuito de mensurar o impacto dessas variações nas propriedades mecânicas da argamassa.

A mistura dos materiais foi realizada em argamassadeira para homogeneização e a aplicação ocorreu manualmente, garantindo uma camada uniforme sobre os blocos cerâmicos. Simultaneamente, os corpos de prova foram moldados, conforme a NBR 13276 (ABNT, 2016) – Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos – Preparo da mistura e determinação do índice de consistência. Após 28 dias de cura os revestimentos foram submetidos ao ensaio de arrancamento, conforme a NBR 13528 (ABNT, 2010).

Para a avaliação dos efeitos da substituição parcial do cimento por biochar de bambu e da areia natural por areia artificial, foram elaborados quinze traços experimentais, variando tanto o tipo de agregado miúdo quanto o teor de biochar incorporado à mistura. Os traços foram organizados em três grupos distintos, conforme o tipo de agregado utilizado: areia natural, areia artificial e uma combinação de ambas. Para cada grupo, foram adotados cinco níveis de substituição do cimento por biochar: 0%, 3%, 5%, 7% e 10%, em massa. A Tabela 5 apresenta a distribuição dos traços experimentais de acordo com esses critérios.

Tabela 5 – Composição dos 15 traços de argamassa.

TRAÇO	CIMENTO (kg)	AREIA NATURAL (kg)	AREIA ARTIFICIAL (kg)	ÁGUA (L)	BIOCHAR (g)
1	0,3	1,8	—	0,13	
2	0,3	—	1,8	0,13	—
3	0,3	0,9	0,9	0,13	
4	0,3	1,8	—	0,13	
5	0,3	—	1,8	0,13	9
6	0,3	0,9	0,9	0,13	
7	0,3	1,8	—	0,13	
8	0,3	—	1,8	0,13	15
9	0,3	0,9	0,9	0,13	
10	0,3	1,8	—	0,13	
11	0,3	—	1,8	0,13	21
12	0,3	0,9	0,9	0,13	
13	0,3	1,8	—	0,13	
14	0,3	—	1,8	0,13	30
15	0,3	0,9	0,9	0,13	

Fonte: Autor (2025).

Os traços 1, 4, 7, 10 e 13 foram compostos exclusivamente por cimento e areia natural; os traços 2, 5, 8, 11 e 14 por cimento e areia artificial; e os traços 3, 6, 9, 12 e 15 por cimento com mistura de areia natural e artificial. Quanto à adição de biochar, os traços 1, 2 e 3 não receberam adição (0%), os traços 4, 5 e 6 receberam 3%, os traços 7, 8 e 9 receberam 5%, os traços 10, 11 e 12 receberam 7%, e os traços 13, 14 e 15 receberam 10% de biochar, em relação à massa do cimento.

O preparo das argamassas foi realizado em argamassadeira, seguindo as proporções de materiais estabelecidas na Tabela 5. Inicialmente, o cimento, o biochar (quando aplicável) e os agregados miúdos foram secos e homogeneizados durante 1 minuto. Em seguida, a água foi adicionada gradualmente, com a mistura prosseguindo por mais 3 minutos, conforme procedimento adaptado da ABNT NBR 13276:2016.

Após o preparo, a argamassa fresca foi vertida em moldes cilíndricos com 5 cm de diâmetro e 10 cm de altura, previamente lubrificados com desmoldante. Para cada traço, foram moldados seis corpos de prova, com o preenchimento realizado em duas camadas, cada uma adensada por meio de 10 golpes com haste metálica distribuídos uniformemente.

Os corpos de prova foram mantidos nos moldes pelo período de 24 horas em ambiente laboratorial, com temperatura controlada ( $23 \pm 2^\circ\text{C}$ ). Após esse período, realizou-se a desmoldagem e a transferência para tanque de cura submersa, e permaneceram por 28 dias, conforme os critérios estabelecidos pela ABNT NBR 13279:2020. Finalizado o período de cura, foram submetidos aos ensaios mecânicos e de durabilidade previstos no estudo.

Dessa forma, a caracterização dos materiais e a execução dos procedimentos de preparo, moldagem, cura e ensaio das argamassas foram conduzidas com base nas normas técnicas vigentes, assegurando a confiabilidade dos resultados. A metodologia adotada possibilitou análise comparativa dos efeitos da substituição simultânea do cimento por biochar de bambu e da areia natural por areia artificial sobre o desempenho das argamassas de revestimento.

### 6.3.Resultados e discussões

Os parâmetros físicos da areia natural e da areia artificial, utilizadas como agregado miúdo, encontram-se detalhados na Tabela 6. A caracterização desses materiais é fundamental, visto que as propriedades intrínsecas exercem influência direta no desempenho das argamassas. Tais atributos modulam o comportamento do compósito no estado fresco, impactando variáveis como a trabalhabilidade, consumo de água e densidade da mistura.

Tabela 6 – Propriedades físicas e caracterização das areias natural e artificial.

PARÂMETRO	AGREGADO MIÚDO	
	AREIA NATURAL	AREIA ARTIFICIAL
Módulo de finura	2,44	2,92
Diâmetro máximo	6,3 mm	4,75 mm
Massa específica	2,63 g/cm <sup>3</sup>	2,89 g/cm <sup>3</sup>
Massa unitária compactada	2,57 g/cm <sup>3</sup>	2,32 g/cm <sup>3</sup>
Massa unitária solta	2,28 g/cm <sup>3</sup>	2,66 g/cm <sup>3</sup>

Fonte: Autor (2025).

Os dados indicam que a areia artificial apresenta um módulo de finura mais elevado (2,92) em comparação à areia natural (2,44), evidenciando uma granulometria mais uniforme. O diâmetro máximo característico da areia natural foi de 6,3 mm, superior à areia artificial, que apresentou valor de 4,75 mm. Esse aspecto sugere o empacotamento otimizado do agregado artificial no estado solto, contribuindo para melhor preenchimento entre partículas.

Em relação à massa específica, a areia artificial apresentou valor mais elevado (2,89 g/cm<sup>3</sup>) que a areia natural (2,63 g/cm<sup>3</sup>), por causa da maior densidade dos grãos obtidos por britagem. Quanto à massa unitária, verificou-se que a areia natural apresentou maior valor na condição compactada (2,57 g/cm<sup>3</sup>), ao passo que a areia artificial obteve maior valor na

condição solta (2,66 g/cm<sup>3</sup>). Tais variações são justificadas pela morfologia das partículas: a areia natural, com grãos predominantemente arredondados, facilita o rearranjo e a densificação sob compactação. Em contraste, a angularidade característica da areia artificial, aliada à regularidade granulométrica, propicia a redução de vazios.

Os resultados dos ensaios de caracterização do cimento Portland e do biochar de bambu estão apresentados na Tabela 7. Observa-se que o biochar de bambu apresenta massa específica aproximadamente 59% inferior ao cimento CPV-ARI, podendo ser atribuído à estrutura altamente porosa e à natureza carbonizada. Essas características tendem a contribuir para a redução da densidade das argamassas, configurando vantagem em aplicações que demandam materiais mais leves. Em relação ao índice de finura, verifica-se que o cimento apresenta um valor 24 vezes superior ao biochar, fator que influencia diretamente o desempenho reativo e a eficiência de dispersão no meio cimentício.

Tabela 7 – Caracterização cimento Portland e do biochar de bambu.

PARÂMETROS	CIMENTO	BIOCHAR
Material	CPV-ARI	Bambu
Massa específica	3,07 g/cm <sup>3</sup>	1,256 g/cm <sup>3</sup>
Superfície Específica	3.518,18 cm <sup>2</sup> /g	146,93 cm <sup>2</sup> /g

Fonte: Autor, (2025).

A Tabela 8 apresenta os resultados obtidos no ensaio de aderência à tração das argamassas com diferentes proporções de substituição do cimento por biochar e areia natural por areia artificial, classificando também as formas de ruptura observadas e indicando a tensão normativas correspondente. Para cada traço avaliado (0%, 3%, 5%, 7% e 10% de substituição), foram realizados três corpos de prova (CP) com área constante de 1963,50 mm<sup>2</sup>.

Os valores de tensão de aderência expressos em (MPa) evidenciam que as formas de ruptura variaram entre diferentes interfaces do sistema, tais como chapisco/argamassa, substrato/chapisco e cola/pastilha. As tensões normativas indicadas correspondem aos valores considerados para avaliação do desempenho, desprezando, em alguns casos, rupturas ocorridas na interface cola/pastilha, que não são representativas da aderência do sistema.

De modo geral, os traços com 3% e 7% de substituição apresentaram as maiores tensões máximas, superiores a 0,37 MPa e 0,43 MPa, respectivamente, enquanto o traço com 10% de substituição apresentou os menores valores, inferiores a 0,26 MPa. Esse comportamento indica que a substituição do cimento por biochar influencia a resistência à aderência, sendo importante a análise da forma de ruptura para a correta interpretação dos resultados.

Tabela 8 – Aderência à tração com classificação das formas de ruptura e tensão normativa.

TRAÇO	CP	TENSÃO (MPa)	TIPO DE RUPTURA	TENSÃO NORMAL (MPa)
0%	1	0,35	Chapisco/Argamassa	0,35
	2	0,34	Chapisco/Argamassa	0,34
	3	0,25	Cola/Pastilha	Desprezado
3%	1	0,37	Argamassa	>0,37
	2	0,43	Chapisco/Argamassa	0,43
	3	0,01	Substrato/Chapisco	Desprezado
5%	1	0,36	Argamassa/Cola	0,36
	2	0,38	Argamassa/Cola	0,38
	3	0,38	Argamassa	>0,38
7%	1	0,43	Argamassa	>0,43
	2	0,44	Cola/Pastilha	Desprezado
	3	0,45	Cola/Pastilha	Desprezado
10%	1	0,24	Argamassa	>0,24
	2	0,17	Cola/Pastilha	Desprezado
	3	0,13	Substrato/Chapisco	Desprezado

Fonte: Autor (2025)

O traço de referência, sem substituições (0%), apresentou resistência compatível com o esperado, porém inferior à observada nos traços com 3%, 5% e 7% de substituição. Esse resultado indica que a utilização controlada de biochar e de agregados reciclados pode contribuir para a melhoria do desempenho mecânico das argamassas.

Conforme NBR 13749 (ABNT, 2013), a resistência mínima exigida para revestimentos internos (com cerâmica ou laminado) e externos é de 0,30 MPa. Observa-se que os traços com 3% e 5% de substituição superam esse valor, demonstrando excelente desempenho técnico. O traço com 7% também apresenta resultado satisfatório (>0,43 MPa), embora duas cápsulas tenham sido desconsideradas por ruptura inadequada. Em contrapartida, o traço com 10% nota-se queda considerável para o valor inferior (0,24 MPa) ao normatizado, evidenciando que há limite para a adição de biochar e areia artificial.

Os resultados dos ensaios de resistência à compressão aos 28 dias de cura, realizados, conforme a NBR 13279 (ABNT, 2020), encontram-se sintetizados na Tabela 9. O traço contendo 5% de substituição alcançou a maior resistência média (3,73 MPa), seguido pelas dosagens com 3% (3,63 MPa) e 7% (3,45 MPa); todos superaram o traço de referência (0%), que registrou 3,40 MPa. Em contrapartida, a substituição no teor de 10% resultou em declínio no desempenho mecânico, com média de 3,20 MPa.

Tais evidências sugerem que teores moderados de substituição promovem o incremento de resistência, ao passo que níveis de substituição elevados tendem a comprometer a integridade da matriz cimentícia.

Tabela 9 – Resistência à compressão: Argamassas de revestimento.

TRAÇO	CPS	FORÇA (TF)	TENSÃO (MPA)	TENSÃO MÉDIA (MPA)
0%	1	0,66	3,30	
	2	0,89	4,45	
	3	0,68	3,40	3,40
	4	0,49	2,45	
3%	1	0,61	3,05	
	2	0,81	4,05	3,63
	3	0,76	3,80	
	4	0,75	3,75	
5%	1	0,71	3,55	
	2	0,71	3,55	3,73
	3	0,78	3,90	
	4	0,69	3,45	
7%	1	0,65	3,25	
	2	0,75	3,75	
	3	0,67	3,35	3,45
	4	0,64	3,20	
10%	1	0,64	3,20	
	2	0,64	3,20	3,20

Fonte: Autor, (2025).

A análise de variância (ANOVA *one-way* – Tabela 9.1) indicou que as substituições simultâneas do cimento por biochar de bambu e da areia natural por areia artificial, nos teores avaliados, não promoveram diferenças estatisticamente significativas na resistência à aderência das argamassas de revestimento ( $p = 0,774$ ). Embora se observe tendência de aumento da resistência para os teores intermediários (3% e 5%), seguida de redução nos maiores teores, tais variações não foram suficientes para rejeitar a hipótese nula ao nível de significância de 5%. Esse comportamento sugere que, nas condições experimentais adotadas, o efeito combinado das substituições não compromete o desempenho mecânico da argamassa.

Tabela 9.1 –ANOVA para a resistência à compressão das argamassas de revestimento.

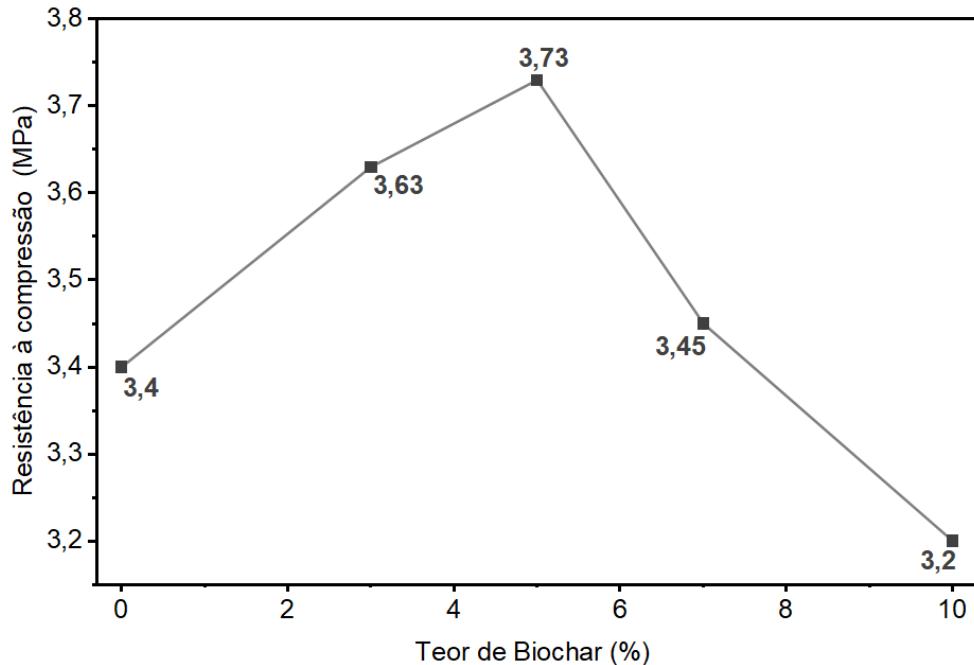
Fonte de variação	Graus de Liberdade	Soma dos quadrados	Quadrado médio	Estatística F	Valor p
Dosagem	4	0,4460	0,1115	0,4447	0,7742
Erro	11	2,7583	0,2508		
Total	15	3,2044			

Fonte: Autor, 2025

O Gráfico 1 ilustra de forma mais clara a hipótese de que o uso controlado de biochar e areia artificial, em teores de até 7%, pode trazer benefícios mecânicos às argamassas, especialmente na faixa de 3% a 5%, considerada ideal sob o ponto de vista da resistência à compressão. Por outro lado, observa-se que a substituição excessiva desses materiais, ou seja, teores superiores a 7%, pode comprometer a resistência à compressão. Esse comportamento sugere a existência de teor ótimo de biochar, sendo que o excesso tende a afetar negativamente a integridade da matriz cimentícia.

Além disso, a presença da areia artificial também parece ter contribuído positivamente para o desempenho mecânico, uma vez que a granulometria regular e maior massa específica favorecem o empacotamento das partículas e a densificação da mistura. Dessa forma, o gráfico fornece uma visualização clara da influência combinada dos materiais alternativos, indicando que a faixa de 3% a 5% representa o melhor equilíbrio entre sustentabilidade e resistência mecânica das argamassas de revestimento.

Gráfico 1 – Resistência à compressão das argamassas de revestimento.

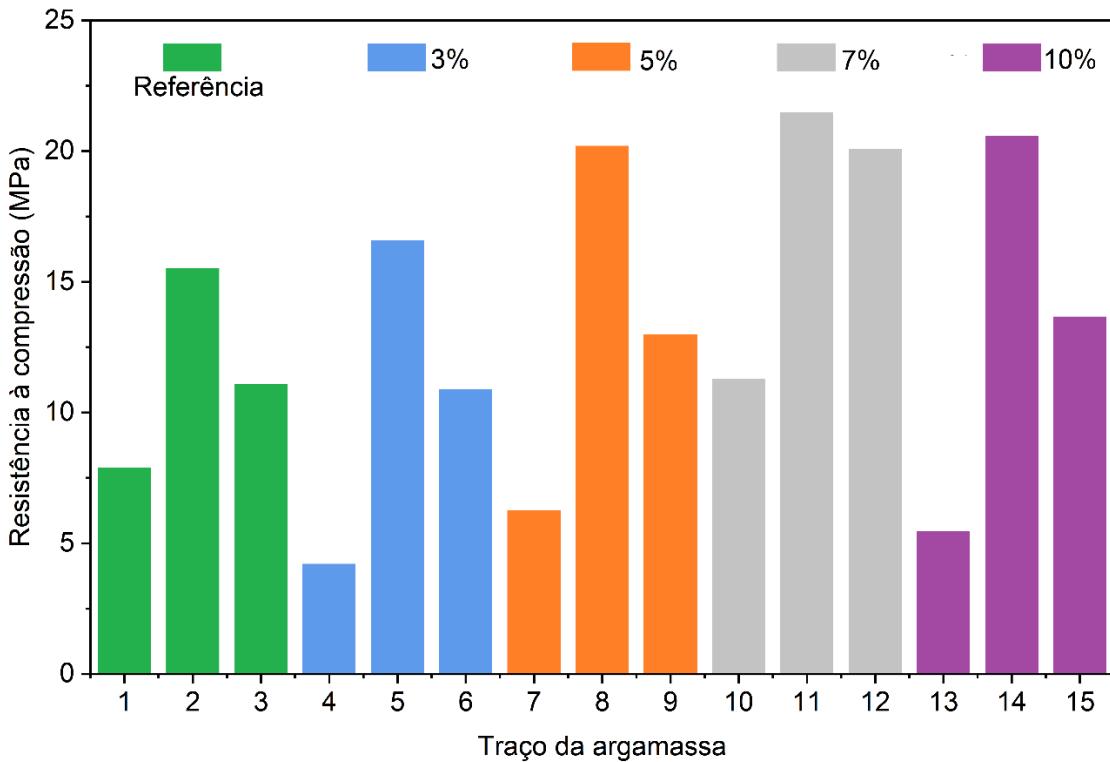


Fonte: Autor (2025)

Visando avaliar a influência da substituição parcial do cimento por biochar de bambu e do agregado miúdo natural por areia artificial na resistência à compressão, foram formulados quinze traços experimentais. A Tabela 10 sintetiza os resultados aos 28 dias de cura, detalhando as forças de ruptura individuais, as tensões correspondentes por corpo de prova e a resistência de cada traço. Tais variações permitem correlacionar o desempenho mecânico aos diferentes teores de substituição, identificando tendências para a otimização de argamassas sustentáveis.

Para subsidiar a análise, o Gráfico 2 ilustra o comportamento de todas as misturas, cujos teores de biochar estão representados por cores distintas: os traços 1 a 3 (referência, 0% – verde), 4 a 6 (3% – azul), 7 a 9 (5% – alaranjado), 10 a 12 (7% – cinza) e 13 a 15 (10% – roxo).

Gráfico 2 – Resistência à compressão referentes aos 15 traços de argamassa.



Fonte: Autor (2025)

Conforme demonstrado no Gráfico 2, as propriedades mecânicas superiores foram observadas nas dosagens compostas exclusivamente por areia artificial, notadamente quando associadas a teores de 5% a 7% de biochar. Destacam-se os traços T11 (21,52 MPa), T14 (20,63 MPa) e T8 (20,23 MPa), cujas resistências excederam significativamente os requisitos normativos vigentes. Em paralelo, as argamassas com agregados mistos (natural e artificial) demonstraram desempenho técnico satisfatório, com ênfase no traço T12 (20,12 MPa; 7% de biochar), o qual, embora ligeiramente inferior aos traços de areia integralmente artificial, ratifica a viabilidade dessa combinação.

De acordo com os critérios de classificação da norma da NBR 13281 (ABNT, 2005), que categoriza a resistência à compressão nas classes P4 (4,0–6,5 MPa), P5 (5,5–9,0 MPa) e P6 (>8,0 MPa), constata-se que a maioria das composições desenvolvidas enquadra na classe P6. Tais resultados corroboram a eficácia do biochar como substituição parcial ao cimento, evidenciando que a faixa de 5% a 7% de adição, em conjunto com o agregado artificial, optimiza a resistência à compressão do compósito.

Tabela 10 – Resistência à compressão referentes aos 15 traços de argamassa.

TRAÇO	CPS	FORÇA (TF)	TENSÃO (MPa)	TENSÃO MÉDIA (MPa)	COMPOSIÇÃO DO TRAÇO	% DO TRAÇO
1	1	1,70	8,49	7,92	Cimento + Areia Natural + Água	0%
	2	1,78	8,89			
	3	1,21	6,05			
	4	1,74	8,69			
	5	1,50	7,47			
2	1	3,32	16,59	15,55	Cimento + Areia Artificial + Água	0%
	2	3,82	19,09			
	3	1,96	9,79			
	4	3,57	17,84			
	5	2,89	14,44			
3	1	2,34	11,69	11,11	Cimento + Areia Artificial + Areia Natural + Água	3%
	2	2,11	10,54			
	3	2,26	11,29			
	4	2,23	11,12			
	5	2,19	10,92			
4	1	1,11	5,55	4,24	Cimento + Areia Natural + Água + Biochar	5%
	2	0,81	4,05			
	3	0,64	3,20			
	4	0,96	4,80			
	5	0,73	3,62			
5	1	4,53	22,63	16,63	Cimento + Areia Artificial + Água + Biochar	3%
	2	2,69	13,44			
	3	2,98	14,89			
	4	3,61	18,04			
	5	2,84	14,16			
6	1	1,85	9,24	10,92	Cimento + Areia Artificial + Areia Natural + Água + Biochar	5%
	2	2,05	10,24			
	3	2,70	13,49			
	4	1,95	9,74			
	5	2,38	11,87			
7	1	1,10	5,50	6,30	Cimento + Areia Natural + Água + Biochar	5%
	2	1,30	6,50			
	3	1,37	6,84			
	4	1,20	6,00			
	5	1,34	6,67			
8	1	3,52	17,59	20,23	Cimento + Areia Artificial + Água + Biochar	5%
	2	4,85	24,23			
	3	3,51	17,54			
	4	4,19	20,91			
	5	4,18	20,88			
9	1	2,16	10,79	13,02	Cimento + Areia Artificial + Areia Natural + Água + Biochar	5%
	2	2,87	14,34			
	3	2,70	13,49			
	4	2,52	12,57			
	5	2,79	13,91			

10	1	1,87	9,34	11,33	Cimento + Areia Natural + Água + Biochar	7%
	2	2,75	13,74			
	3	2,02	10,09			
	4	2,31	11,54			
	5	2,39	11,92			
11	1	4,18	20,88	21,52	Cimento + Areia Artificial + Água + Biochar	7%
	2	4,41	22,03			
	3	4,30	21,48			
	4	4,30	21,46			
	5	4,36	21,76			
12	1	4,07	20,33	20,12	Cimento + Areia Artificial + Areia Natural + Água + Biochar	7%
	2	3,88	19,39			
	3	4,18	20,88			
	4	3,98	19,86			
	5	4,03	20,13			
13	1	1,50	7,49	5,49	Cimento + Areia Natural + Água + Biochar	7%
	2	0,76	3,80			
	3	1,15	5,75			
	4	1,13	5,65			
	5	0,96	4,77			
14	1	3,46	17,29	20,63	Cimento + Areia Artificial + Água + Biochar	10%
	2	4,21	21,03			
	3	4,69	23,43			
	4	3,84	19,16			
	5	4,45	22,23			
15	1	2,79	13,94	13,70	Cimento + Areia Artificial + Areia Natural + Água + Biochar	7%
	2	2,68	13,39			
	3	2,78	13,89			
	4	2,74	13,66			
	5	2,73	13,64			

Fonte: Autor (2025)

Inicialmente, a análise dos traços de referência (0% de biochar — T1, T2 e T3) permitiu isolar o efeito do tipo de agregado na resistência à compressão. O T1, composto exclusivamente por agregado miúdo natural, apresentou resistência média de 7,92 MPa. Em contraste, o T2 (100% de areia artificial) alcançou 15,55 MPa, representando incremento de aproximadamente 96% em relação ao T1. O T3, com composição paritária de ambos os agregados, obteve 11,11 MPa. Tais resultados ratificam que a areia artificial favorece o desempenho mecânico do compósito devido à acentuada angularidade e rugosidade.

Nas dosagens com 3% de biochar (T4, T5 e T6), observou-se comportamento distinto, conforme a natureza do agregado. O T4 (areia natural) exibiu redução acentuada, com média de 4,24 MPa (declínio de 46% em relação ao T1). Por outro lado, o T5 (areia artificial) atingiu 16,63 MPa, superando o T2, sugerindo que a incorporação de teores reduzidos de biochar, quando associada a agregados britados, não prejudica a resistência. O T6 (misto) manteve estabilidade com 10,92 MPa, valor similar ao traço correspondente sem biochar.

No patamar de 5% de substituição (T7, T8 e T9), verificou-se o desempenho mais expressivo do estudo. O T8, combinando biochar e areia artificial, alcançou 20,23 MPa — ganho de 30% em relação ao T2. O T7 (areia natural) registrou 6,30 MPa, valor superior ao T4, indicando uma possível atenuação do impacto negativo, conforme o ajuste do teor. O T9 (misto) atingiu 13,02 MPa, reforçando a eficiência da substituição de 5% na densificação da matriz.

Aos 7% de incorporação (T10, T11 e T12), o desempenho manteve-se elevado. O T10 alcançou 11,33 MPa (43% superior ao T1), demonstrando que, neste teor, o biochar contribui para o ganho de resistência mesmo em matrizes com areia natural. O T11 apresentou 21,52 MPa, o segundo maior resultado da pesquisa, evidenciando o efeito sinérgico entre o biochar e a areia artificial. O T12 consolidou essa tendência com 20,12 MPa.

Por fim, os traços com 10% de biochar (T13, T14 e T15) indicaram o início de uma trajetória de declínio mecânico. O T13 registrou 5,49 MPa, valor inferior às dosagens de 3% a 7%. O T14 manteve patamar elevado (20,63 MPa), porém com leve redução frente ao T11. O T15 apresentou 13,70 MPa, inferior ao equivalente com 7%. Esses dados confirmam que teores acima de 7% tendem a comprometer a resistência à compressão, limitando o benefício da substituição, especialmente em matrizes com agregados naturais.

A análise de variância (ANOVA *one-way*), cujos dados encontram-se na Tabela 10.1, comprovou a existência de disparidades estatisticamente significativas entre as dosagens avaliadas ( $F = 45,95$ ;  $\alpha = 5\%$   $p < 0,0001$ ), evidenciando que as distintas combinações de biochar e tipo de agregado miúdo influenciam significativamente o desempenho das argamassas.

Constatou-se que as matrizes compostas por areia artificial alcançaram patamares de resistência superiores aos sistemas baseados em areia natural, independentemente da concentração de biochar incorporada. Ademais, os dados sugerem que a eficácia do biochar é estritamente condicionada ao empacotamento granular da mistura; enquanto teores intermediários de substituição otimizaram o desempenho técnico quando associados à areia artificial, verificou-se decréscimo acentuado nos sistemas com agregado natural.

Tabela 10.1 –ANOVA para a resistência à compressão referentes aos 15 traços de argamassa.

Fonte de variação	Graus de Liberdade	Soma dos quadrados	Quadrado médio	Estatística F	Valor p
Dosagem	14	2337,29	166,9490	45,9545	<0,0001
Erro	60	217,96	3,6329		
Total	74	2555,26			

Fonte: Autor, 2025

A influência da substituição parcial do cimento Portland por biochar na sorção capilar das argamassas foi avaliada por meio da análise de variância (*one-way* ANOVA –Tabela 11). O teste estatístico resultou em  $F = 0,5686$  e  $p = 0,6915$ , evidencia que a substituição parcial do cimento por biochar, nos teores investigados, não promoveu alterações significativas no comportamento higroscópico das argamassas, considerando o efeito global das formulações. Observando variações pontuais nos valores médios, especialmente para o teor de 5%, tais diferenças não foram suficientes para rejeitar a hipótese nula ao nível de significância de 5%, sugerindo que os mecanismos de absorção capilar permaneceram estatisticamente equivalentes entre os traços.

Tabela 11 –ANOVA para absorção de água por capilaridade.

Fonte de variação	Graus de Liberdade	Soma dos quadrados	Quadrado médio	Estatística F	Valor p
Dosagem	4	0,1341	0,0335	0,5686	0,6915
Erro	10	0,5895	0,0589		
Total	14	0,7235			

Fonte: Autor, 2025

Tais evidências convergem com a literatura científica contemporânea, a qual postula que a incorporação de baixos teores de biochar como substituto cimentício mantém a integridade das propriedades físicas dos compósitos (SILVA *et al.*, 2023; OLIVEIRA; SANTOS, 2022). Sob essa ótica, o biochar de bambu posiciona-se como material cimentício suplementar (MCS) promissor, contribuindo para a descarbonização da construção civil ao mitigar a dependência do cimento Portland sem prejuízos ao desempenho higroscópico.

Todavia, para validação holística de exequibilidade técnica, é imprescindível a investigação sistemática das propriedades mecânicas e da durabilidade em regime de serviço a longo prazo. Os resultados referentes à cinética de absorção de água por capilaridade encontram-se compilados na Tabela 11.1 e são analisados subsequentemente.

Tabela 11.1 – Resultados do ensaio de absorção de água por capilaridade.

TRAÇO	MASSA SECO (g)	MASSA APÓS 72h (g)	ABSORÇÃO (g/cm <sup>2</sup> )	COMPOSIÇÃO DO TRAÇO	% DO TRAÇO BIOCHAR
1	265,00	268,00	0,15	Cimento + Areia Natural + Água	
2	309,00	325,00	0,81	Cimento + Areia Artificial + Água	0%
3	337,00	349,00	0,61	Cimento + Areia Artificial + Areia Natural + Água	

4	265,00	271,00	0,31	Cimento + Areia Natural + Água + Biochar	
5	334,00	349,00	0,76	Cimento + Areia Artificial + Água + Biochar	3%
6	361,00	374,00	0,66	Cimento + Areia Artificial + Areia Natural + Água + Biochar	
7	308,00	319,00	0,56	Cimento + Areia Natural + Água + Biochar	
8	375,00	394,00	0,97	Cimento + Areia Artificial + Água + Biochar	5%
9	342,00	358,00	0,81	Cimento + Areia Artificial + Areia Natural + Água + Biochar	
10	321,00	328,00	0,36	Cimento + Areia Natural + Água + Biochar	
11	374,00	390,00	0,81	Cimento + Areia Artificial + Água + Biochar	7%
12	354,00	362,00	0,41	Cimento + Areia Artificial + Areia Natural + Água + Biochar	
13	298,00	312,00	0,71	Cimento + Areia Natural + Água + Biochar	
14	377,00	386,00	0,46	Cimento + Areia Artificial + Água + Biochar	10%
15	297,00	311,00	0,71	Cimento + Areia Artificial + Areia Natural + Água + Biochar	

Fonte: Autor, (2025).

Nas dosagens de referência, sem adição de biochar (T1, T2 e T3), os resultados ratificaram a influência determinante da natureza do agregado na sorção capilar. O T1 (areia natural) registrou o menor coeficiente da série ( $0,15 \text{ g/cm}^2$ ), indicando matriz de baixa porosidade. Em contrapartida, o emprego de areia artificial elevou a absorção para  $0,81 \text{ g/cm}^2$  (T2) e  $0,61 \text{ g/cm}^2$  (T3, agregado misto), evidenciando que a morfologia ou a granulometria do agregado artificial incrementa a porosidade aberta do sistema.

Com a incorporação de 3% de biochar (T4, T5 e T6), houve aumento generalizado na absorção capilar em comparação às referências. Embora o T4 (areia natural) tenha mantido um patamar moderado ( $0,31 \text{ g/cm}^2$ ), as composições com areia artificial (T5) e mista (T6) atingiram  $0,76 \text{ g/cm}^2$  e  $0,66 \text{ g/cm}^2$ , respectivamente. Tais valores sugerem que baixos teores de substituição são tecnicamente viáveis, mantendo a integridade da matriz.

Na substituição de 5% (T7, T8 e T9), a tendência de crescimento na permeabilidade intensificou-se. O T7 (areia natural) apresentou  $0,56 \text{ g/cm}^2$ , enquanto o T8 (areia artificial) atingiu o ápice de absorção da pesquisa ( $0,97 \text{ g/cm}^2$ ). Este resultado aproxima-se do limite crítico de  $1,0 \text{ g/cm}^2$ , podendo comprometer a durabilidade frente a agentes externos. O comportamento do T9 ( $0,81 \text{ g/cm}^2$ ) reforça a hipótese de que a interação entre biochar e areia artificial amplia a rede de poros interconectados.

Sob o teor de 7% de substituição (T10, T11 e T12), os resultados evidenciaram maior estabilidade no comportamento higroscópico das matrizes. O T10 (areia natural) registrou coeficiente de  $0,36 \text{ g/cm}^2$ , patamar considerado tecnicamente satisfatório para a estanqueidade do material. Em paralelo, o T11 (areia artificial) reiterou a tendência de elevada sorção ( $0,81 \text{ g/cm}^2$ ), mantendo a proporcionalidade observada nas dosagens precedentes com este agregado. Notadamente, o T12 (areia mista) apresentou o desempenho mais eficiente entre as composições aditivadas com biochar, atingindo  $0,41 \text{ g/cm}^2$ . Tal comportamento sugere que a sinergia entre o subproduto carbonáceo e a distribuição granulométrica híbrida otimizou o empacotamento de partículas, reduzindo a porosidade e a interconectividade capilares.

Para o teor de 10% (T13, T14 e T15), observou-se oscilação nos dados. O T13 e o T15 registraram  $0,71 \text{ g/cm}^2$ , indicando aumento da porosidade em relação aos teores intermediários. Contudo, o T14 (areia artificial) apresentou redução atípica para  $0,46 \text{ g/cm}^2$ . Tal singularidade pode estar associada ao efeito de 'cura interna', e a umidade retida nos poros do biochar auxilia na hidratação contínua do cimento, embora a validação deste mecanismo demande investigações complementares.

Em síntese, os coeficientes de adsorção mais reduzidos foram verificados nas dosagens com areia natural e baixas concentrações de biochar, com ênfase nos traços T1 ( $0,15 \text{ g/cm}^2$ ) e T10 ( $0,36 \text{ g/cm}^2$ ), confirmando a menor porosidade aberta e a maior estanqueidade das matrizes. Em oposição, o emprego de agregados artificiais elevou a susceptibilidade higroscópica, atingindo o ápice no T8 ( $0,97 \text{ g/cm}^2$ ) sob teor de 5% de substituição. A utilização de agregados mistos (natural e artificial) demonstrou ser uma alternativa tecnicamente equilibrada, destacando o T12 ( $0,41 \text{ g/cm}^2$ ; 7% de biochar) por conciliar baixa permeabilidade e durabilidade potencial.

Conclui-se, portanto, que o intervalo de substituição entre 3% e 7% de biochar é o mais favorável à mitigação da absorção de umidade, sendo a composição com agregados híbridos a que melhor equaliza a resistência mecânica e a integridade estrutural.

#### 6.4. Conclusão

Este estudo investigou os efeitos da substituição parcial do cimento Portland por biochar de bambu e do agregado miúdo natural por areia artificial em matrizes cimentícias para revestimento, visando compatibilizar desempenho técnico e sustentabilidade. Mediante ensaios de resistência à compressão axial, absorção de água por capilaridade e resistência de aderência à tração, foram caracterizadas as propriedades mecânicas e físico-hídricas de diversas dosagens.

Os resultados evidenciaram que a incorporação de biochar em teores controlados — notadamente entre 5% e 7% — em sinergia com o uso de areia artificial, incrementou significativamente a resistência à compressão, superando o patamar de 20 MPa. Tais formulações classificam-se na categoria P6 ( $> 8,0$  MPa) da ABNT NBR 13281:2005, tornando-as tecnicamente aptas para aplicação em vedações externas submetidas a condições de exposição severas.

No que tange ao comportamento higroscópico, constatou-se elevação gradual da porosidade aberta em função do incremento no teor de biochar e da substituição integral da areia natural. Contudo, as composições com até 7% de biochar preservaram coeficientes de sorção em níveis satisfatórios, especialmente nas matrizes com agregados mistos ou naturais. Tal comportamento reitera que o controle estequiométrico das proporções é imperativo para a manutenção da durabilidade frente a agentes deletérios.

Quanto à resistência de aderência à tração, as dosagens com 5% e 7% de biochar demonstraram desempenho superior ao traço de referência, excedendo os requisitos mínimos da ABNT NBR 13528:2010. Esse incremento sugere que o biochar atua favoravelmente na zona de transição com o substrato, potencializado pela granulometria da areia artificial, que otimiza o empacotamento de partículas e a ancoragem mecânica do compósito.

Em síntese, a substituição de 5% de cimento por biochar, associada ao uso de areia artificial ou agregados híbridos, representa a condição de equilíbrio ideal entre propriedades mecânicas, aderência e estanqueidade. Essa combinação resulta em material tecnicamente viável e ambientalmente promissor para a descarbonização da construção civil.

#### 6.5. Referências Bibliográficas (Capítulo 1 – Artigo 1)

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 9779:2012** – Argamassa e concreto endurecidos – Determinação da absorção de água por capilaridade. Rio de Janeiro: ABNT, 2012.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5752:201** – Materiais pozolânicos — Determinação do índice de desempenho com cimento Portland aos 28 dias. Rio de Janeiro: ABNT, 2014.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 13528:2010** – Revestimento de paredes e tetos de argamassas inorgânicas – Determinação da resistência de aderência à tração. Rio de Janeiro: ABNT, 2010.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 13276:2016** – Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos – Preparo da mistura e determinação do índice de consistência. Rio de Janeiro: ABNT, 2016.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 13279:2020** – Argamassa para assentamento e revestimento – Determinação da resistência à tração na flexão e à compressão. Rio de Janeiro: ABNT, 2020.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 13281:2005** Argamassa para assentamento e revestimento – Requisitos. Rio de Janeiro: ABNT, 2005.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 13749:2013** – Revestimento de paredes e tetos de argamassas inorgânicas – Especificação. Rio de Janeiro: ABNT, 2013.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 16605:2017** Cimento Portland ou outros materiais em pó – Determinação da massa específica. Rio de Janeiro: ABNT, 2017.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 16372:2015** Cimento Portland e outros materiais em pó – Determinação da finura pelo método de permeabilidade ao ar – Método de Blaine. Rio de Janeiro: ABNT, 2015.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 16697:2018** Cimento Portland – Requisitos. Rio de Janeiro: ABNT, 2018.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 17054**: Agregados – Determinação da composição granulométrica – Método de ensaio. Rio de Janeiro: ABNT, 2022.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR NM 45**: Agregado – Determinação da massa unitária e do volume de vazios. Rio de Janeiro: ABNT, 2006.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR NM 52**: Agregado miúdo – Determinação da massa específica e massa específica aparente. Rio de Janeiro: ABNT, 2009.

COSTA, M. L.; MENDES, R. F. O.; SILVA, A. S. A. Análise do uso de biochar de bambu na substituição parcial de cimento em argamassas. **Revista Brasileira de Engenharia Sustentável**, v. 12, n. 4, p. 132-145, 2020.

CIPLAN (Organização). **Ciplan**, [s.d.]. Homepage institucional com informações sobre produtos de cimento. Disponível em: <<https://www.ciplan.com.br/>>. Acesso em: 16 dez. 2025

DAVIS, M.; WILLIAMS, T.; KIM, S. Cement replacement with biochar and its effects on concrete properties. **Journal of Sustainable Materials and Structures**, v. 21, p. 134-142, 2015.

FARIA, S. L.; MONTEIRO, S. N.; PEREIRA, P. M. Estudo da substituição de areia natural por areia artificial em argamassas. **Journal of Construction and Materials**, v. 29, p. 89-97, 2019.

FRÍAS, M.; MARTÍNEZ-RAMÍREZ, S.; GUTIÉRREZ, F. J. Utilização de resíduos como substituto do cimento em argamassas e concretos. **Materials Science Forum**, v. 737, p. 25-34, 2012.

FRÍAS, M.; RODRÍGUEZ, J.; SUÁREZ, F. Use of biochar in cementitious materials: an alternative for sustainable construction. **Construction and Building Materials**, v. 39, p. 55-63, 2012.

HUA, Y.; ZHAO, P.; LIU, X. Sustainable construction materials: biochar as a cement replacement. **Materials Science Forum**, v. 10, p. 179-185, 2017.

ISHIKAWA, P. H.; OLIVEIRA, L. P. Propriedades da argamassa com areia artificial para revestimento de alvenaria. **Revista de Engenharia Civil**, v. 12, n. 1, p. 45-52, 2012.

KIM, H.; LEE, B.; PARK, J. Biochar and its potential use in concrete as a substitute for cement. **Science of the Total Environment**, v. 672, p. 244-253, 2018.

MENDONÇA, R. R.; ALMEIDA, P. S.; SILVA, T. D. Effects of artificial sand in cementitious materials. **Journal of Construction and Building Materials**, v. 180, p. 38-47, 2018.

MENDES, R. F. O.; RODRIGUES, M. C. D.; DOURADO, D. C. Efeito da utilização de biochar da casca de café sobre as propriedades do concreto. **Revista Brasileira de Construção Sustentável**, v.10, p.45-58, 2021.

OLIVEIRA, L. G.; BERNARDI, J. M.; FERREIRA, L. P. Sustainable cement replacement with biochar in construction. **Sustainable Construction Research Journal**, v. 45, p. 76-84, 2020.

OLIVEIRA, L. P.; ISHIKAWA, P. H.; PEREIRA-DE-OLIVEIRA, L. Propriedades da argamassa com areia artificial para revestimento de alvenaria. **Revista de Engenharia Civil**, v. 8, p. 34-41, 2012.

PEREIRA, C. R.; SANTOS, M. P.; ROCHA, G. L. Densities and mixture ratios in mortar formulations for environmental sustainability. **Construction Materials and Techniques**, v. 12, p. 98-107, 2015.

RODIER, L.; MARCO, M.; FERRARI, A. Effect of bamboo biochar on cement-based materials. **Construction and Building Materials**, v. 139, p. 405-412, 2017.

SILVA, A. S.; RODRIGUES, M. S.; FERREIRA, C. L. Avaliação das propriedades mecânicas de argamassas com substituição parcial de cimento por biochar. **Construction and Sustainable Materials Journal**, v. 4, p. 105-113, 2019.

SILVA, R. D.; COSTA, F. M.; LIMA, T. O. The influence of artificial sand in cement mixtures. **Journal of Civil Engineering Research**, v. 39, p. 54-60, 2021.

VIDAL, M.; ALVAREZ, R.; FERNÁNDEZ, R. Environmental benefits of replacing river sand with artificial sand in concrete. **Materials and Design Journal**, v. 42, p. 190-199, 2017.

VILLAR-COCIÑA, E.; CAMPO, C.; GÓMEZ, J.; FERRERO, G. Effect of biochar on the pozzolanic activity of materials for concrete. **Materials Chemistry and Physics**, v. 124, p. 576-585, 2010.

YUAN, Q.; ZHANG, W.; LIU, Z. Substitution of cement with sustainable materials: Analyzing the effectiveness of biochar. **Construction Materials and Systems**, v. 19, p. 146-152, 2016.

ZHAO, Z.; LIU, F.; ZHANG, Y. Use of biochar as a partial replacement of cement: Enhancing concrete properties. **Sustainability in Civil Engineering Journal**, v. 12, p. 203-211, 2019.

ZHANG, L.; LI, X.; TANG, H. Biochar as a cement replacement: A comprehensive study on concrete performance. **Advanced Materials Science and Engineering**, v. 7, p. 43-51, 2014.

## 7. CONSIDERAÇÕES FINAIS

À luz dos resultados discutidos nesta dissertação, conclui-se que:

- I. A substituição parcial do cimento Portland por biochar de bambu em teores de até 7% demonstrou exequibilidade técnica em matrizes de revestimento, sendo as concentrações de 3% e 5% as que proporcionaram o desempenho mecânico otimizado, tanto em resistência à compressão axial quanto em aderência à tração;
- II. O emprego de agregado miúdo artificial em substituição à areia natural potencializou a resistência à compressão das argamassas, efeito este maximizado quando em sinergia com teores intermediários de biochar, possivelmente devido ao melhor empacotamento granulométrico;
- III. No que tange ao comportamento higroscópico, a incorporação de biochar e areia artificial tendeu a incrementar a porosidade aberta do compósito. Contudo, teores de substituição cimentícia de até 7%, associados a agregados naturais ou híbridos, preservaram coeficientes de sorção compatíveis com as exigências de estanqueidade para vedações externas;
- IV. Todas as dosagens investigadas satisfizeram os requisitos mínimos da ABNT NBR 13281:2023, com expressiva parcela das amostras atingindo as classes de alto desempenho P5 e P6, ratificando a viabilidade técnica da utilização concomitante de biochar de bambu e agregados alternativos;
- V. A resistência de aderência à tração, em conformidade com a ABNT NBR 13528:2019, manteve-se em patamares normativos adequados, evidenciando que a modificação da matriz não comprometeu a integridade da interface revestimento-substrato.

Como desdobramentos para investigações futuras, sugerem-se os seguintes eixos de pesquisa:

- i. Investigar a influência da cal hidratada, em proporções variadas, sobre as propriedades reológicas, a aderência e a durabilidade de argamassas aditivadas com biochar e agregados alternativos;
- ii. Avaliar a vida útil e o desempenho em serviço do compósito por meio de ensaios de durabilidade acelerada, incluindo ciclos de degradação térmica e química;
- iii. Realizar estudos de viabilidade técnico-econômica e análise de ciclo de vida (ACV), visando consolidar o biochar e os agregados residuais como soluções sustentáveis e de baixo carbono para o setor da construção civil.