

**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

**SUBSTITUIÇÃO PARCIAL DE BIOCHAR EM RELAÇÃO AO
CIMENTO PORTLAND PARA CONFEÇÃO DE CONCRETO
E ARGAMASSA COM PROPRIEDADES DE ALTO
DESEMPENHO SUSTENTÁVEL**

Autor: Koffi JEAN-BAPTISTE AGNONSOU

Orientador: Dr. Michell Macedo Alves

Coorientador: Alex Neves Junior

RIO VERDE – GO

março – 2026

Koffi JEAN-BAPTISTE AGNONSOU

**SUBSTITUIÇÃO PARCIAL DE BIOCHAR EM RELAÇÃO AO
CIMENTO PORTLAND PARA CONFECCÃO DE CONCRETO
E ARGAMASSA COM PROPRIEDADES DE ALTO
DESEMPENHO SUSTENTÁVEL**

Dissertação apresentada, como parte das exigências para obtenção do título de Mestre em Engenharia Aplicada e Sustentabilidade, ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Aplicada e Sustentabilidade – PPGEAS, do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia Goiano – Campus Rio Verde – Área de concentração em Tecnologia e Ciência dos Materiais.

Orientador: Prof. Dr. Michell Macêdo Alves.

Coorientador: Alex Neves Junior

RIO VERDE - GO

março – 2026

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

K78s AGNONSOU, Koffi jean-baptiste
 SUBSTITUIÇÃO PARCIAL DE BIOCHAR EM RELAÇÃO
 AO CIMENTO PORTLAND PARA CONFEÇÃO DE
 CONCRETO E ARGAMASSA COM PROPRIEDADES DE
 ALTO DESEMPENHO SUSTENTÁVEL / Koffi jean-baptiste
 AGNONSOU. Rio Verde 2026.

60f. il.

Orientador: Prof. Dr. Dr. Michell Macedo Alves.

Coorientador: Prof. Dr. Alex Neves Junior.

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 ressarcimento de direitos autorais, conforme permissão assinada abaixo, para fins de leitura, download e impressão, a título de divulgação da produção técnico-científica no IF Goiano.

IDENTIFICAÇÃO DA PRODUÇÃO TÉCNICO-CIENTÍFICA

Tese (doutorado)

Dissertação (mestrado)

Monografia (especialização)

TCC (graduação)

Artigo científico

Capítulo de livro

Livro

Trabalho apresentado em evento

Produto técnico e educacional - Tipo:

Nome completo do autor:

Matrícula:

Título do trabalho:

RESTRIÇÕES DE ACESSO AO DOCUMENTO

Documento confidencial: Não Sim, justifique:

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

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 técnico-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.

Local

/ /
Data

Assinatura do autor e/ou detentor dos direitos autorais

Ciente e de acordo:

Assinatura do(a) orientador(a)



SERVIÇO PÚBLICO FEDERAL
MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
SECRETARIA DE EDUCAÇÃO PROFISSIONAL E TECNOLÓGICA
INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA GOIANO

Ata nº 14/2026 - 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: 99
Data: 27/03/2026	Hora de início: 17:00h	Hora de encerramento: 21:00h
Matrícula do discente:	2024102331440003	
Nome do discente:	Koffi Jean-Baptiste Agnonsou	
Título do trabalho:	SUBSTITUIÇÃO PARCIAL DE BIOCHAR EM RELAÇÃO AO CIMENTO PORTLAND PARA CONFECÇÃO DE CONCRETO E ARGAMASSA COM PROPRIEDADES DE ALTO DESEMPENHO SUSTENTÁVEL	
Orientador:	Michell Macedo Alves	
Área de concentração:	Engenharia Aplicada e Sustentabilidade	
Linha de Pesquisa:	Tecnologia e gestão em construção civil e infraestrutura	
Projeto de pesquisa de vinculação	SUBSTITUIÇÃO PARCIAL DE BIOCHAR EM RELAÇÃO AO CIMENTO PORTLAND PARA CONFECÇÃO DE CONCRETO E ARGAMASSA COM PROPRIEDADES DE ALTO DESEMPENHO SUSTENTÁVEL	

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), Prof. Dr. Andrielli Moraes de Oliveira (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 **KOFFI JEAN-BAPTISTE AGNONSOU**, 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 25/05/2026 10:49:03.
- **Marcel Willian Reis Sales**, PROFESSOR ENS BASICO TECN TECNOLOGICO , em 25/05/2026 11:19:25.

Este documento foi emitido pelo SUAP em 05/02/2026. 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: 785979
Código de Autenticação: 63b5f9716b



Documento assinado digitalmente

gov.br **EDGAR BACARJI**
 Data: 02/06/2026 17:41:49-0300
 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



SERVIÇO PÚBLICO FEDERAL
MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
SECRETARIA DE EDUCAÇÃO PROFISSIONAL E TECNOLÓGICA
INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA GOIANO

Documentos 11/2026 - SREPG/CMPR/CPG-RV/DPGPI-RV/CMPRV/IFGOIANO

SUBSTITUIÇÃO PARCIAL DE BIOCHAR EM RELAÇÃO AO CIMENTO PORTLAND PARA CONFEÇÃO DE CONCRETO E ARGAMASSA COM PROPRIEDADES DE ALTO DESEMPENHO SUSTENTÁVEL

Autor: Koffi Jean-Baptiste Agnonsou
Orientador: Prof. Dr. Michell Macedo Alves

TITULAÇÃO: Mestre em Engenharia Aplicada e Sustentabilidade - Área de Concentração Engenharia Aplicada e Sustentabilidade

APROVADO em 27 de março de 2026.

Prof. Dr. Edgar Bacarji
Avaliador Externo
Universidade Federal de Goiás

Prof. Dr. Marcel Willian Reis Sales
Avaliador Interno
IFGOIANO / Rio Verde

Prof. Dr. Andrielli Moraes de Oliveira
Avaliador Externo
Universidade Federal de Goiás

Prof. Dr. Michell Macedo Alves
Presidente da banca
IFGOIANO / Rio Verde



Documento assinado digitalmente
EDGAR BACARJI
Data: 02/06/2026 17:41:49-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Documento assinado eletronicamente por:

- **Michell Macedo Alves, PROFESSOR ENS BASICO TECN TECNOLOGICO**, em 25/05/2026 10:45:45.
- **Marcel Willian Reis Sales, PROFESSOR ENS BASICO TECN TECNOLOGICO**, em 25/05/2026 10:50:05.

Este documento foi emitido pelo SUAP em 05/02/2026. 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: 785973

Código de Autenticação: 2d7355d304



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

“Eu não me envergonho de corrigir meus erros e mudar as opiniões, porque não me envergonho de raciocinar e aprender.”

Alexandre Herculano

DEDICATÓRIA

A meu irmão **Serge AGNONSOU**, pelo incentivo e apoio incondicional para que eu pudesse ingressar no mestrado.

Minha gratidão é imensa.

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente à FAPEG (Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Goiás), pelo apoio financeiro concedido, fundamental para a realização deste mestrado.

Ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Aplicada e Sustentabilidade (PPGEAS), pela oportunidade de crescimento acadêmico e profissional, bem como pelo ambiente de aprendizado e troca de conhecimentos.

Ao meu coordenador, Prof. Dr. Édio Damásio da Silva Júnior, pela presença constante, orientação e apoio ao longo de toda a jornada. Sua dedicação fez a diferença em meu percurso.

Ao meu orientador, Prof. Michell Macedo Alves, por sua orientação precisa, paciência e confiança em meu trabalho. Sua contribuição foi essencial para o desenvolvimento deste estudo.

Ao meu coorientador, Prof. Alex Neves Júnior, pela colaboração, pelas valiosas sugestões e pela disposição em compartilhar seu conhecimento.

A todos, minha sincera gratidão.

BIOGRAFIA DO AUTOR

Koffi JEAN-BAPTISTE AGNONSOU, profissional de engenharia civil, nascido em Lambaréné, no Gabão, filho de pais beninenses, com nacionalidade oficial do Benim. Possui uma licenciatura profissional em Engenharia Civil, obtida pela Escola Superior de Engenharia Civil VERECHAGUINE A.K em república do Benin na África ocidental.

Acumulou experiência prática atuando como condutor de obras por dois anos na empresa Architecte du Possible. Atualmente, mestrando no Programa de Pós-Graduação em Engenharia Aplicada e Sustentabilidade do Instituto Federal Goiano de Educação, Ciência e Tecnologia, no Brasil. Interessado por inovação técnica e sustentabilidade na construção civil, busca desenvolver soluções eficientes e sustentáveis para os desafios contemporâneos da engenharia.

ÍNDICE

DEDICATÓRIA	iii
AGRADECIMENTOS	iv
BIOGRAFIA DO AUTOR	v
ÍNDICE DE TABELAS.....	ii
ÍNDICE DE FIGURAS	iii
LISTA DE SÍMBOLOS, SIGLAS, ABREVIACÕES E UNIDADES	iv
1. INTRODUÇÃO.....	1
1.4.1. Biochar: Conceito, Dinâmica de Produção e Propriedades.....	5
1.4.2. Outras Rotas de Produção: Gaseificação e Carbonização Hidrotérmica ...	7
1.4.3. Interação Química e Atividade Pozolânica	8
1.4.3.1.....	8
1.4.4. Efeito Filler e Nucleação Heterogênea.....	8
1.4.5 Caracterização Comparativa: Biochar vs. Cimento Portland.....	9
1.4.6 Biochar de arroz no contexto da sustentabilidade e mitigação climática..	11
2. OBJETIVOS	13
2.1. Geral.....	13
2.2 Específicos	13
3. REFERÊNCIA	14
4. CAPÍTULO I – ARTIGO	17
4.1 Introdução	19
4.2 Materiais	20
4.3 Método	21
4.4 Resultados e Discussões	27
4.6 Agradecimentos	40
5. Referências	41
6. APÊNDICE.....	45

ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 1.Artigos de maior relevância selecionados via software StArt.	3
Tabela 2.Tipos de Pirólise e seus Produtos	7
Tabela 3.Propriedades físico-químicas de partículas do biochar e do cimento	9
Tabela 4:Produção Mundial de Arroz e Consumo Per Capita	11
Tabela 5:Caracterização do agregado miúdo (areia).....	21
Tabela 6: Parâmetros do ensaio de Índice de Atividade Pozolânica.....	23
Tabela 7:Composição em Massa dos Traços de Argamassa Erro! Indicador não definido.	
Tabela 8:Ensaio realizados nas argamassas	24
Tabela 9:Preparação, moldagem e cura dos corpos de prova.....	25
Tabela 10:Dosagem dos concretos com substituição parcial por biochar Erro! Indicador não definido.	
Tabela 11:Ensaio realizados no concreto	25
Tabela 12: Composição química do biocarvão	28

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1: Indicadores da Revisão Sistemática via software StArt	3
Figura 2: Produção do biochar a partir de resíduos sólidos	6
Figura 3: Estrutura conceitual do sistema biochar-clima	12
Figura 4: Corpos de prova capeados e prensa utilizada no ensaio de compressão.	27
Figura 5: Resistência à compressão das argamassas para determinação do índice de atividade pozolânica (IAP), conforme ABNT NBR 5752.	27
Figura 6: Curva TG/DTG do biochar de casca de arroz	30
Figura 7: Imagens de SEM de biochar de casca de arroz em diferentes ampliações	31
Figura 8: Curva Granulométrica do agregado miúdo	32
Figura 9: Absorção Total de Água em função do teor de biochar	33
Figura 10: Resistência à compressão aos 28 dias de cura de argamassa	34
Figura 11: Resistência à Compressão do Concreto com Biochar	35
Figura 12: Evolução da absorção de água por capilaridade para os diferentes teores de BCA e idades de cura	37

LISTA DE SÍMBOLOS, SIGLAS, ABREVIACÕES E UNIDADES

INT – Instituto Nacional de Tecnologia;

IPT – Instituto de Pesquisas Tecnológicas;

CCA – cinza de casca de arroz;

IA – inteligência artificial;

ABCP – Associação Brasileira de Cimento Portland;

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas;

ACI – American Concrete Institute;

BBC – bagasse biochar;

BC – biochar;

CP – corpos de prova;

GBCT – Global Building Climate Tracker;

GlobalABC – Aliança Mundial para Edifícios e Construção;

HBC – hardwood biochar;

IEA – Agência Internacional de Energia;

NBR – Norma Brasileira;

OPC – Ordinary Portland Cement;

RHBC – rice husk biochar;

SBC – switchgrass biochar;

MPa – mega pascal;

IAP – Índice de Atividade Pozolânica;

AICEP – Agência para o Investimento e Comércio Externo de Portugal;

UE – União Europeia;

GEE – gases de efeito estufa;

ITZ – Zona de Transição Interfacial;

RHB – rice husk biochar (carvão vegetal de casca de arroz);

GtCO_{2e} – gigatoneladas de equivalente de dióxido de carbono.

RESUMO

O uso da argamassa e do concreto tradicionais são essenciais na maioria das infraestruturas de construção e obras públicas. No entanto, esses materiais são feitos principalmente à base de cimento Portland, um componente que utiliza energia de forma intensiva e gera quantidade significativa de gases de efeito estufa, contribuindo para o aquecimento global. Tal situação representa considerável desafio para o setor da construção, que precisa encontrar equilíbrio entre o desenvolvimento sustentável e as crescentes necessidades de infraestrutura. O biochar, um carvão orgânico produzido por pirólise de resíduos orgânicos, pode ser utilizado como alternativa ao cimento. Dessa forma, o principal objetivo deste estudo é desenvolver uma mistura que permita substituir parcialmente o cimento, utilizando subprodutos da casca de arroz, a partir da qual se produzirá concreto e argamassa de alto desempenho com propriedades melhoradas, visando soluções mais eficientes e sustentáveis para a indústria da construção. A metodologia utilizada neste estudo compreendeu duas fases principais. Em primeiro lugar, efetuou-se uma revisão da literatura com o auxílio do programa StArt (State of the Art by Systematic Review), com o objetivo de traçar um panorama atual sobre o tema, permitindo determinar os conteúdos de substituição. Em seguida, iniciou-se à fase experimental, que consistiu na dosagem e produção de argamassas e concretos com teores de substituição parcial do cimento por biochar, a saber, 1%, 5% e 10% em peso. Realizaram-se análises químicas, destacando-se o teste de reatividade pozolânica segundo o método de Chapelle, além da caracterização física (densidade, porosidade e absorção de água por capilaridade) e mecânicas (resistência à compressão). Os resultados mostraram que o índice de desempenho com cimento Portland aos 28 dias, expresso em porcentagem (%), atingiu 176% após arredondamento para o número inteiro, ultrapassando o limite mínimo de 75% estabelecido pela norma ABNT NBR 5752:2014 para a avaliação da atividade pozolânica de materiais baseados em cimento Portland. A maior resistência à compressão das argamassas após 28 dias de cura foi obtida com taxa de substituição de 10%, ou seja, 28,24 MPa, enquanto a argamassa de referência atingiu 18,17 MPa no mesmo período. Para os concretos, a resistência máxima foi registrada com taxa de substituição de 5% aos 56 dias, atingindo a média de 46,65 MPa, ao contrário da amostra de referência, que apresentou 35,56 MPa no mesmo período. A adição de biochar resultou em redução na capacidade de retenção de água da argamassa, que passou de 8,61% (referência) para 5,11% após a adição de 10% de biochar. Conclui-se que a adição de até 5% de biochar melhora as características físico-mecânicas, ao mesmo tempo em que contribui para a descarbonização e a sustentabilidade dos materiais cimentícios.

Palavras-chave: Argamassas; concreto, Biochar; Propriedades mecânicas; Atividade pozolânica.

ABSTRACT

The use of traditional mortar and concrete is essential in most construction and public works projects. However, these materials are primarily made from Portland cement, a component that is energy-intensive and generates a significant amount of greenhouse gases, contributing to global warming. This situation represents a considerable challenge for the construction sector, which must find a balance between sustainable development and growing infrastructure needs. Biochar, an organic charcoal produced by organic waste pyrolysis, can be used as an alternative to cement. Therefore, the main objective of this study is to develop a mixture that allows for the partial replacement of cement using rice husk waste products, from which high-performance concrete and mortar with improved properties will be produced, aiming for more efficient and sustainable solutions for the construction industry. The methodology used in this study included two main phases. Firstly, a literature review was conducted using the State of the Art by Systematic Review (StArt) software, with the goal of providing an overview of the current state of the subject, allowing the contents of the substitution to be defined. Next, the experimental phase began, which consisted of the mixing and production of mortars and concretes with partial cement replacement by biochar, specifically 1%, 5%, and 10% by mass. Chemical analyses were performed, notably the pozzolanic reactivity test according to the Chapelle method, in addition to physical characterization (density, porosity, and capillary water absorption) and mechanical testing (compressive strength). The results showed that the performance index for Portland cement at 28 days, expressed as a percentage (%), attained 176% after rounding to the nearest whole number, exceeding the minimum limit of 75% established by ABNT NBR 5752:2014 for evaluating the pozzolanic activity of Portland cement-based materials. The highest compressive strength of the mortars after 28 days of curing was obtained with a 10% replacement rate, that is, 28.24 MPa, while the reference mortar reached 18.17 MPa over the same period. For the concrete, the maximum strength was recorded with a 5% replacement rate at 56 days, reaching an average of 46.65 MPa, in contrast to the reference sample, which showed 35.56 MPa over the same period. The addition of biochar resulted in a reduction in the mortar's water retention capacity, which decreased from 8.61% (reference) to 5.11% after the addition of 10% biochar. It is concluded that the addition of up to 5% biochar improves the physical-mechanical characteristics, while contributing to the decarbonization and sustainability of cementitious materials.

KEYWORDS: Mortars; concrete; Biochar; Mechanical properties; Pozzolanic activity.

Estrutura da dissertação

Esta dissertação é composta por uma introdução geral e um capítulo de desenvolvimento, organizados da seguinte forma:

- Introdução: Apresenta o contexto e a justificativa da pesquisa, delimitando o problema estudado. Inclui o quadro teórico e a revisão sistemática da literatura, abordando os principais avanços científicos, as definições e os conceitos fundamentais que sustentam o desenvolvimento do tema. A hipótese de pesquisa, o objetivo geral e os objetivos específicos também são detalhados neste capítulo.
- Capítulo 1: Constitui o centro do trabalho, detalhando a metodologia experimental aplicada. Este capítulo descreve os procedimentos de ensaio e apresenta os resultados obtidos, bem como as discussões pertinentes, tanto para as matrizes de argamassa quanto para as de concreto incorporando biochar..

1. INTRODUÇÃO

1.1 Justificativa

O Sexto Relatório de Avaliação (AR6) do Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas (IPCC) ressalta a necessidade de descarbonização em setores de alto impacto, considerando que as emissões globais de gases de efeito estufa (GEE) têm atingido o nível de 60 Gigatoneladas de equivalente de dióxido de carbono. Apesar de o aquecimento global a longo prazo ser estimado entre 1,1°C e 1,3°C, registros recentes mostram variações de temperatura que oscilam entre 1,41°C e 1,47°C, resultando na intensificação de eventos climáticos extremos, degradação de ecossistemas, comprometimento dos recursos hídricos e da segurança alimentar o que acaba pressionando também o setor da construção. Este setor, responsável pelo consumo anual de 30 bilhões de toneladas de agregados e aglomerantes (Xiao *et al.*, 2025), tem na fabricação do cimento Portland seu principal gargalo ambiental: estima-se que a produção de cada tonelada deste insumo gere a cerca de 0,95 toneladas de CO₂, respondendo por aproximadamente 7% a 8% das emissões globais (Muthukrishnan *et al.*, 2019).

Diante dessa realidade, a transição do padrão de produção linear (extrair-fabricar-descartar) para o conceito de economia circular, em conformidade com as orientações do novo plano de ação da Comissão Europeia, exige dissociação entre o crescimento do setor e o consumo de recursos não renováveis (Kirchherr *et al.*, 2017). A busca por materiais cimentícios alternativos de baixa pegada de carbono constitui, portanto, um desafio estratégico (Wen *et al.*, 2023). Entre as diversas opções, o biochar (biocarvão) destaca-se pela estabilidade química e capacidade de sequestrar carbono em matrizes sólidas por longos períodos (Senadhira *et al.*, 2023; Wang *et al.*, 2020). Entretanto, apesar de seu potencial para atenuar os danos ambientais, ainda não se sabe muito sobre como o biochar de casca de arroz afeta as propriedades físico-químicas e mecânicas das matrizes cimentícias. A falta de dados padronizados e de estudos sobre o comportamento cinético e a durabilidade desse material limita a aplicação em escala industrial, especialmente no contexto brasileiro.

O presente estudo justifica-se pela necessidade de caracterizar, tanto do ponto de vista técnico quanto mecânico, a troca parcial do cimento pelo biochar proveniente da casca de arroz. Ele visa comprovar a viabilidade dessa biomassa residual como uma matéria-prima essencial, que pode ajudar a diminuir a pegada de carbono do setor e a desenvolver materiais de construções mais sustentáveis e eficientes.

1.2 Problema

Como a substituição parcial do cimento Portland por biochar de casca de arroz (1%, 5% e 10%) afeta as propriedades reológicas, mecânicas e de durabilidade de argamassas e concretos?

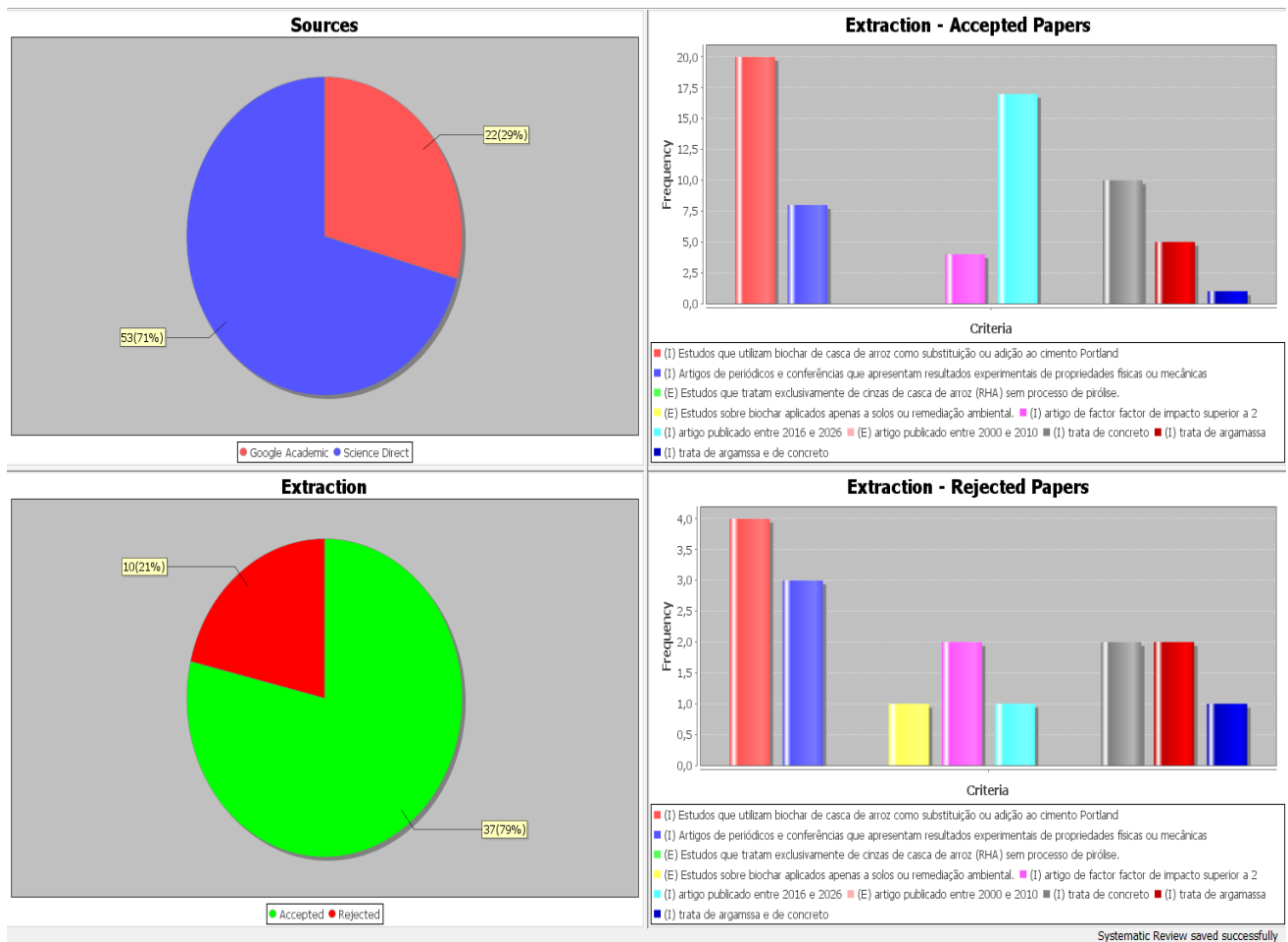
1.3 Hipótese de pesquisa

A substituição parcial do cimento Portland por biochar de casca de arroz (até 10%) melhora a durabilidade e mantém a resistência à compressão de matrizes cimentícias.

1.4 Revisão de Literatura

O objetivo desta seção é explorar e sintetizar os dados científicos e as descobertas mais significativas da literatura atual sobre o uso do biochar como componente estratégico no setor da construção civil. Esta revisão abrange tanto a origem desse material como subproduto da agroindústria e seus processos de produção, quanto sua influência nas propriedades físico-mecânicas e na durabilidade das matrizes cimentícias. Para garantir o rigor científico, a clareza e a reprodutibilidade desta avaliação, a abordagem adotada seguiu as diretrizes recomendadas para revisões sistemáticas. Para tal, foi utilizado o programa StArt (State of the Art through Systematic Review), que permitiu organizar de forma metódica as etapas de pesquisa, seleção e coleta de informações. Conforme os dados gerados pelo software (Figura 1), a busca foi realizada majoritariamente na base ScienceDirect (71%) e complementada pelo Google Acadêmico (29%). De um universo inicial de 75 estudos, 37 artigos (79%) foram aceitos após passarem por critérios de inclusão que priorizaram estudos experimentais e publicações recentes entre 2016 e 2026. A seleção final destacou autores como Li *et al.* (2025) e Singh *et al.* (2025), cujos trabalhos obtiveram os maiores scores de relevância no processo de extração.

Figura 1: Indicadores da Revisão Sistemática via software StArt.



Fonte: Dados da pesquisa gerados no software StArt (2026) pelo autor.

A extração de dados realizada no software StArt permitiu identificar os estudos de maior relevância para esta pesquisa, classificados por meio de um sistema de pontuação (*score*) que considera o alinhamento com os objetivos experimentais e o rigor metodológico. A Tabela (1) apresenta a síntese dos principais artigos que compõem o estado da arte deste trabalho, destacando o potencial de aplicação do biochar na construção civil.

Tabela 1. Artigos de maior relevância selecionados via software StArt.

Título do Estudo	Autor (s)	Ano
Effects of coffee husk biochar on the properties of concrete	Coelho, Nayane Pereira Freire; Nalon, Gustavo Henrique; <i>et al.</i>	2025
Effect of cement partial substitution by waste-based biochar in mortar properties	Maljaee, Hamid; Paiva, Helena; Maddi, Rozita; Tarelho, Luis.	2021
Comparing influence of inert biochar and silica rich biochar on cement mortar	Gupta, Souradeep; Muthukrishnan, Shravan; Kua, Harn Wei.	2021

Application of rice husk biochar as filler in cenospheres modified mortar	Gupta, Souradeep; Kua, Harn Wei.	2020
Mechanical and microstructural regulation of biochar-geopolymer composites	Hao, Dong-yue; Guo, Yu-chen; Rong, Chen; <i>et al.</i>	2026
Mortar performance enhancement by partial replacement of cement with hybrid biochar	Khan, Ismail; Saddiqi, Hassan Ahmad; Ahmad, Farooq; <i>et al.</i>	2025
Effect of various biochars on physical, mechanical, and microstructural characteristics	Haris Javed; Muhammad; Ali Sikandar; Muhammad; Ahmad.	2022
Upcycling rice husk biochar into carbon-negative composites	Huang, Gang; Xia, Yan; Liu Yue; Li Huan; Zhang Yuying.	2025
Effective use of biochar as an additive for alkali-activated slag mortar production	Egodagamage, Harshani; Yapa, H.D.; Smith, Buddika; <i>et al.</i>	2023
Mechanical properties durability and carbon reduction evaluation of biochar-based mortar	Li, Xiangyu; Xu, Zhenzhen; Zhang, Jianwei; <i>et al.</i>	2025
Accelerated carbonation curing of biochar-cement mortar	Chen, Yuyang; Zhan, Binggen; Guo, Binglin; <i>et al.</i>	2024
Development of multifunctional cementitious composite using biochar	Ahmed, Saad; Rehman, Abdul; Amjad, Atiq; <i>et al.</i>	2024
Enhancing the strength and durability of mixed biochar-blended mortars	Singh, Shweta; Shekharan, K.; Ruddhira, R.; <i>et al.</i>	2025
A review on circular economy: the expected transition to a balanced interplay	Ghisellini, Patrizia; Cialani, Catia; Ulgiati, Sergio.	2016
Application of rice husk biochar and thermally treated low silica rice husk ash	Muthukrishnan, Shravan; Gupta, Souradeep; Kua, Harn Wei.	2019
A review on the roles of biochar incorporated into cementitious materials	Chen, Ling; Zhou, Tao; Yang, Jinzhong; <i>et al.</i>	2023
Biochar: An emerging recipe for designing sustainable horticulture	Zulfiqar, Faisal; Moosa, Anam; Nazir, Muhammad Mudassir.	2022
Biochar as green additives in cement-based composites with carbon dioxide curing	Wang, Lei; Chen, Liang; Tsang, Daniel C.W.; <i>et al.</i>	2020
Application of biochar in concrete – a review	Senadeera, Sachini Supunsala; Gupta, Souradeep; Kua, Harn Wei.	2023
Biochar as a partial cement replacement material for developing sustainable concrete	Tan, Kang-Hao; Wang, Tian-Yu; Zhou, ZHeng; <i>et al.</i>	2021
Properties of cement mortar containing pulverized biochar pyrolyzed	Tan, Kanghao; Pang, Xijun; Qin, Yinghong; Wang, Junsong.	2020
Uso do biochar de casca de arroz em pastas de baixa relação água/cimento	Lopes, Marcos Antonio Pereira; Junior, Alex Neves; Bianchini.	2023
Valorization of waste-derived biochar in ultra-high-performance concrete	Du, Jiang; Wang, Yuhuan; Bao, Yi; Sarkar, Dibyendu; <i>et al.</i>	2023
Effect of water entrainment by pre-soaked biochar particles on strength	Gupta, Souradeep; Kua, Harn Wei.	2018
Rice straw biochar-enhanced carbonation sequestration in recycled concrete	Xing, Xuejin; Zhao, Jianjun; Ye, Mao; Li, Xiangde; Chen, Jun.	2026
Investigation of the macro performance and mechanism of biochar modified ultrahigh	Zhang, Qiuyue; Dong, Shuangkuai; Wu, Fulei; <i>et al.</i>	2024
Synergistic biochar-fly ash blended cementitious systems	Shirzad, Sharareh; Mahyari, Ehsan; Culpepper, Jonathan.	2026

Harnessing biochar for green construction: A review of its applications	Usha Rani, Valluru; Rathish Kumar, P.; Ramesh Nayaka, R.	2025
Corn waste-derived biochar as a sustainable fine aggregate in pervious concrete	Bualuang, Thanong; Jitsangiam, Peeraphong; Chusai, Nutchapong.	2025
Novel soybean dregs biochar concrete: Characterization and evaluation	Liu, Shujie; Chen, Zheng; Shao, Jie; Luo, Shujian; Yu, Deliang.	2025
Waste rice straw biochar recycled concrete: Carbon sequestration durability	Ying, Xuejin; Zhao, Xiao; Ye, Mao; Wang, Cheng; Zhang, Bao.	2025
Synthesis and evaluation of rice straw-derived biochar as cement replacement	De Guzman, Allah Irsih R.; Mateo, Wendy C.; Denson, Melba.	2025
Promoting internal curing in concrete by replacing sand with sustainable biochar	Wang, Dong; Jantwal, Anushka; Kaynak, Elif; Sass, Gabriel.	2025
Progress and prospects of biochar as concrete filler: A review	Zhou, Yuan; Wang, Sheliang; Chen, Ling.	2025
Development of carbon-negative recycled concrete fine bricks	Xu, Dejin; Cheng, Hua; Cao, Wenkai; Chen, Peiyuan; Wang.	2025
Mechanical and durability properties of biochar concrete	Aneja, Akash; Sharma, R.L.; Singh, Harpal.	2022

Fonte: Dados da pesquisa extraídos do software StArt (2026).

Além dos artigos selecionados e pontuados via software StArt, esta revisão consolidou-se mediante a consulta de fontes complementares essenciais para a fundamentação teórica. Tais fontes incluem normas técnicas como da American Society for Testing and Materials (**ASTM C618**), livros de referência sobre ciência do biochar (exemplo: Lehmann *et al.*, 2015) e estudos clássicos de caracterização de resíduos agroindustriais. Estas referências adicionais, embora não listadas na extração sistemática de dados experimentais, são fundamentais para a definição de conceitos e estão devidamente citadas ao longo deste capítulo e listadas na seção de Referências Bibliográficas deste trabalho.

1.4.1. Biochar: Conceito, Dinâmica de Produção e Propriedades

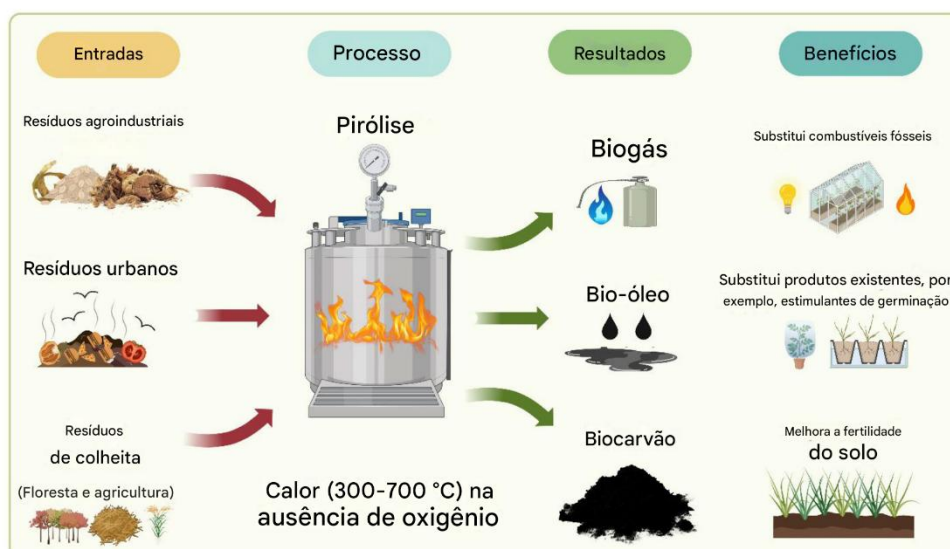
Segundo Zhang *et al.* (2024), o biochar, tipo de material sólido, poroso e rico em carbono, obtido a partir da conversão termoquímica de biomassa sob condições controladas, geralmente com limitação ou ausência de oxigênio. Trata-se de um produto estável, composto majoritariamente por carbono aromático condensado, capaz de desempenhar funções ambientais, energéticas e tecnológicas. Sua utilização remonta a práticas ancestrais, como a terra preta de índio encontrada na Amazônia, conhecida pela contribuição à fertilidade do solo. A biomassa usada na produção pode vir de diferentes fontes, como resíduos agrícolas (palha, cascas), resíduos florestais (galhos, serragem) e até mesmo resíduos urbanos (como o lodo de

esgoto), o que faz do biochar uma alternativa eficiente para o reaproveitamento desses materiais (Lehmann *et al.*, 2015).

De acordo com Usman *et al.* (2025), o biochar tem despertado crescente interesse científico e tecnológico devido ao potencial multifuncional, incluindo aplicações ambientais, agrícolas e, mais recentemente, na construção civil, especialmente como substituto parcial do cimento Portland. A eficiência em matrizes cimentícias é determinada pelos parâmetros de produção. Conforme identificado no protocolo de seleção do **StArt**, a temperatura de pirólise, a taxa de aquecimento e o tempo de residência influenciam diretamente a qualidade do material. Temperaturas moderadas (300–400°C) tendem a produzir biochars com maior teor de compostos voláteis, enquanto temperaturas elevadas (500–700°C) conduzem à formação de estruturas mais aromáticas e estáveis (BREWER & BROWN, 2012; MENGESHA *et al.*, 2024).

A literatura selecionada nesta revisão evidência que o biochar pode ser obtido por diferentes rotas termoquímicas, sendo a pirólise a mais amplamente empregada nos estudos voltados à aplicação em materiais cimentícios. Segundo Zhang *et al.* (2024), a pirólise consiste no aquecimento da biomassa em atmosfera com ausência ou baixa concentração de oxigênio, resultando na formação de um sólido carbonáceo com elevada estabilidade química e estrutural. A Figura (2) ilustra melhor as diferentes etapas da transformação dos resíduos agroindustriais e urbanos (incluindo os resíduos de colheita da silvicultura e da agricultura) através do processo de pirólise.

Figura 2. Produção do biochar a partir de resíduos sólidos.



Fonte : Zulfiqar, Faisal, *et al.* (2022) traduzido pelo autor.

Em função dos parâmetros de funcionamento, o procedimento de pirólise pode classificar-se em três subclasses: pirólise lenta, pirólise rápida e pirólise instantânea. A Tabela (2) resume como a variação desses parâmetros impacta os produtos finais.

Tabela 2. Tipos de Pirólise e seus Produtos.

Tipo de Pirólise	Taxa de Aquecimento	Faixa de Temperatura (°C)	Produtos Principais
Pirólise Lenta	Lento	300 – 700	Carvão, bio óleo e gás
Pirólise Rápida	Muito rápido	600 – 1000	bio-óleo
Pirólise Instantânea	Muito rápido	800 – 1000	Gases e bio óleo

Fonte: CUNHA, Tiago Manuel Almeida (2020).

A escolha da Pirólise Lenta para o biochar de casca de arroz (RHBC) justifica-se pela necessidade de preservar a sílica em estado amorfo. De acordo com Tan *et al.* (2021) e Singh *et al.* (2025), temperaturas acima de 700°C podem iniciar a cristalização da sílica em cristobalita ou quartzo, o que reduz drasticamente a reatividade pozolânica dentro da matriz de concreto.

1.4.2. Outras Rotas de Produção: Gaseificação e Carbonização Hidrotérmica

Embora a pirólise lenta seja a técnica predominante na literatura para fins de construção civil, o biochar pode ser produzido por outros processos que variam em temperatura, pressão e estado da matéria-prima.

Gaseificação: Nesse processo, a biomassa é aquecida a temperaturas elevadas, geralmente entre 700°C e 1 000°C com uma quantidade controlada de oxigênio ou vapor.

O objetivo principal é a produção de gás combustível (syngas), mas o subproduto sólido resultante é um biochar com porosidade muito elevada e baixo teor de voláteis, devido à alta severidade térmica. Em aplicações em materiais cimentícios, o biochar de gaseificação tende a atuar predominantemente como filler mineral, contribuindo para o refinamento da microestrutura e para a densificação da matriz. No entanto, a variabilidade composicional e o elevado teor de cinzas podem limitar a utilização, exigindo caracterização detalhada antes da incorporação ao cimento ou à argamassa.

Carbonização Hidrotérmica (HTC): Diferente da pirólise, a HTC utiliza biomassa úmida e ocorre em meio aquoso sob alta pressão (em autoclaves) e temperaturas moderadas entre 180°C e 250°C. O produto resultante é frequentemente chamado de hidrochar. Ele possui características químicas distintas, como maior presença de grupos funcionais oxigenados, mas geralmente apresenta uma área superficial menor que o biochar pirolisado. Apesar de seu potencial, o uso de hidrochar em materiais de construção ainda é menos explorado, sendo

necessários estudos adicionais para avaliar a durabilidade, compatibilidade química com o cimento Portland e efeitos a longo prazo nas propriedades mecânicas.

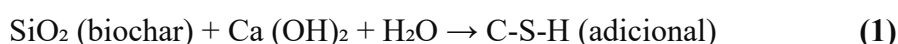
1.4.3. Interação Química e Atividade Pozolânica

A viabilidade do biochar de casca de arroz (RHBC) como substituto parcial do cimento Portland fundamenta-se na capacidade de atuar como um Material Cimentício Suplementar (SCM). Conforme identificado na revisão sistemática, essa interação ocorre por meio de dois mecanismos principais: a atividade pozolânica e o efeito físico de preenchimento (*filler*).

1.4.3.1. Mecanismo de Reação Pozolânica

A atividade pozolânica do biochar de casca de arroz (RHBC) está diretamente relacionada ao elevado teor de sílica (SiO_2), especialmente quando essa sílica se encontra na forma amorfa, condição essencial para que o material apresente alta reatividade química. No processo de hidratação do cimento Portland (OPC), os principais compostos minerais (O silicato tricálcico (C_3S) e o silicato dicálcico (C_2S), reagem com a água, formando o silicato de cálcio hidratado (C-S-H), responsável pela resistência mecânica, e o hidróxido de cálcio ($\text{Ca}(\text{OH})_2$), também conhecido como portlandita.

Nesse contexto, o biochar atua de maneira complementar ao sistema cimentício. A sílica amorfa presente em sua composição reage com a portlandita liberada durante a hidratação, consumindo esse subproduto e gerando uma quantidade adicional de gel C-S-H, conforme representado na equação (1):



Estudos de alto score no StArt, como Maljaee *et al.* (2021) e Singh *et al.* (2025), confirmam que biochars com maior área superficial e teor de SiO_2 apresentam índices de atividade pozolânica superiores aos limites normatizados (exemplo: ASTM C618), resultando em ganho de resistência mecânica a longo prazo e no refinamento da microestrutura.

1.4.4. Efeito Filler e Nucleação Heterogênea

Além de participar das reações químicas, o biochar também exerce uma função física muito importante na melhoria da microestrutura do material cimentício. Sua presença contribui diretamente para uma matriz mais compacta e resistente.

Efeito filler: As partículas finas de biochar conseguem ocupar os pequenos espaços vazios existentes entre os grãos de cimento. Esse preenchimento reduz a porosidade total do material e, conseqüentemente, dificulta a entrada e a circulação de agentes agressivos, favorecendo a durabilidade.

Sítios de nucleação: Devido à sua superfície naturalmente rugosa e altamente porosa, o biochar funciona como ponto de apoio para o início da formação dos produtos de hidratação. Estudos como os de Zhang *et al.* (2022) e Aneja & Sharma (2022) mostram que essa característica pode acelerar as reações iniciais do cimento, contribuindo para o desenvolvimento mais rápido da microestrutura da pasta.

Interface de Transição (ITZ): A combinação entre a reatividade pozzolânica e o efeito físico do biochar ajuda a melhorar a zona de transição entre a pasta de cimento e os agregados; região que normalmente representa o ponto mais frágil do concreto. Com uma interface mais densa e melhor aderida, o material tende a apresentar melhor desempenho mecânico e maior durabilidade ao longo do tempo.

1.4.5 Caracterização Comparativa: Biochar vs. Cimento Portland

Para entender como o biochar transforma o concreto, precisamos olhar "sob o capô" e comparar as entranhas químicas com as do cimento Portland tradicional (OPC).

A Tabela (3) apresenta uma comparação detalhada entre as partículas de cimento Portland comum (OPC) e diferentes tipos de biochar, incluindo o de casca de arroz (RHBC) e o de lodo (SBC), mostrando que são dois materiais de naturezas opostas, mas que podem ser complementares.

Tabela 3. Propriedades físico-químicas de partículas do biochar e do cimento.

Propriedades físico-químicas	OPC	BBC	RHBC	SBC	HBC
Masse volumique (g/cm ³)	3.05	0.2-1.1	-	1.1-1.3	0.5-0.6
SiO ₂ (%)	20.44	7.84	15.77	43.62	5.67
Al ₂ O ₃ (%)	2.84	0.43	0.03	0.49	0.60
Fe ₂ O ₃ (%)	4.64	1.19	0.05	0.76	2.36
CaO (%)	67.73	6.00	0.19	3.65	22.37
MgO (%)	1.43	0.74	0.04	1.55	0.48
SO ₃ (%)	2.40	-	0.03	0.99	0.27
Na ₂ O and K ₂ O (%)	0.28	2.48	1.06	6.07	1.41
MnO (%)	0.16	0.06	0.02	0.15	0.83
P ₂ O ₅ (%)	-	0.44	0.15	3.86	0.20
LOI (%)	1.8	78.97	-	-	0.51
Tamanho partícula (µm)	10-40	-	>1 mm	-	1-1.5 mm

Volume do poro (m ³ /g)	-	0.15-0.94	0.10	3.02	2.07
Área de superfície específica (m ² /g)	1.75	202	164	132	3.82
Reatividade pozolânico	-	620	600	-	-

Fonte : Tan, Kang-Hao, *et al.* (2021).

1.4.5.1 O peso e a leveza: A densidade

A primeira diferença gritante é o peso. Enquanto o cimento é denso e pesado (3,05g/cm³), o biochar de casca de arroz (RHBC) é extremamente leve. Isso acontece porque, durante a pirólise, a biomassa perde quase tudo o que é líquido e gasoso, sobrando apenas um "esqueleto" de carbono e minerais. Na prática, isso significa que se pode produzir estruturas mais leves sem necessariamente perder volume.

1.4.5.2 O "Esqueleto" Mineral e a Norma Técnica

O biochar costuma ser considerado apenas pelo seu teor de carbono, mas a Tabela 3 revela um detalhe que mostra todo o verdadeiro valor, que é ser rico em minerais. No caso do cimento com biochar (SBC), por exemplo, ele contém até 43% de sílica. Se junta a sílica, a alumina e o ferro, chega-se ao total de quase 50%; o que é relevante, porque a norma ASTM C618 utiliza precisamente esses valores para classificar o que é um material pozolânico. Noutras palavras, o biochar não serve apenas para «preencher o volume»; possui o poder químico de reagir e criar ligantes cimentícios.

1.4.5.3. A Esponja Microscópica: Área Superficial

O número mais impressionante, no entanto, é a área superficial específica. O cimento tem a área superficial de 1,75m²/g. O biocarvão de arroz, por outro lado, atinge 164. imagine que um único grama de biocarvão tem uma área de contato centenas de vezes maior do que a do cimento. Essa característica faz com que ele funcione em duas frentes: 1) Como um Filler: Ele entra nos menores buracos da pasta de cimento, onde o grão do próprio cimento não consegue chegar; 2) Como uma Âncora: Essa vastidão de superfície serve como "porto" para que os produtos da hidratação se fixem e cresçam, criando uma rede muito mais entrelaçada e resistente.

A distribuição do tamanho das partículas e a morfologia variam consideravelmente dependendo da matéria-prima e do tempo de moagem. Conforme apontado por Tan *et al.* (2021) e Singh *et al.* (2025), o ajuste do tamanho das partículas é fundamental para garantir que o

biocarvão atue tanto como um enchimento físico quanto como um agente químico ativo na matriz.

1.4.6 Biochar de arroz no contexto da sustentabilidade e mitigação climática

Segundo estimativas iniciais do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE), a produção brasileira de arroz para o ano de 2024 foi projetada em aproximadamente 10,5 milhões de toneladas. Entretanto, dados atualizados da Companhia Nacional de Abastecimento (Conab) indicam que a safra 2024/25 apresentou desempenho superior ao inicialmente previsto, alcançando a cerca de 12,1 milhões de toneladas. Esse incremento foi associado à ampliação da área cultivada e ao aumento da produtividade média nas principais regiões produtoras do país. Esses números confirmam a relevância do Brasil como maior produtor de arroz da América Latina e evidenciam a disponibilidade significativa de resíduos agroindustriais, como a casca de arroz, com potencial para aplicações tecnológicas e ambientais, conforme mostra a Tabela (4).

Portanto, este subproduto, frequentemente descartado de maneira inadequada, representa uma oportunidade significativa de reaproveitamento sustentável, contribuindo para práticas mais alinhadas aos objetivos de descarbonização do setor da construção.

Assim, a produção de carvão de biomassa por pirólise limitaria as emissões de CO₂ na atmosfera, retendo o carbono proveniente da matéria orgânica no carvão sólido, em vez de permitir a rápida decomposição. O carvão de biomassa contribuiria, portanto, duplamente para a mitigação das mudanças climáticas: reduziria as emissões e prolongaria a captura de carbono em aplicações de longo prazo, como materiais de construção.

Tabela 4: Produção Mundial de Arroz e Consumo Per Capita.

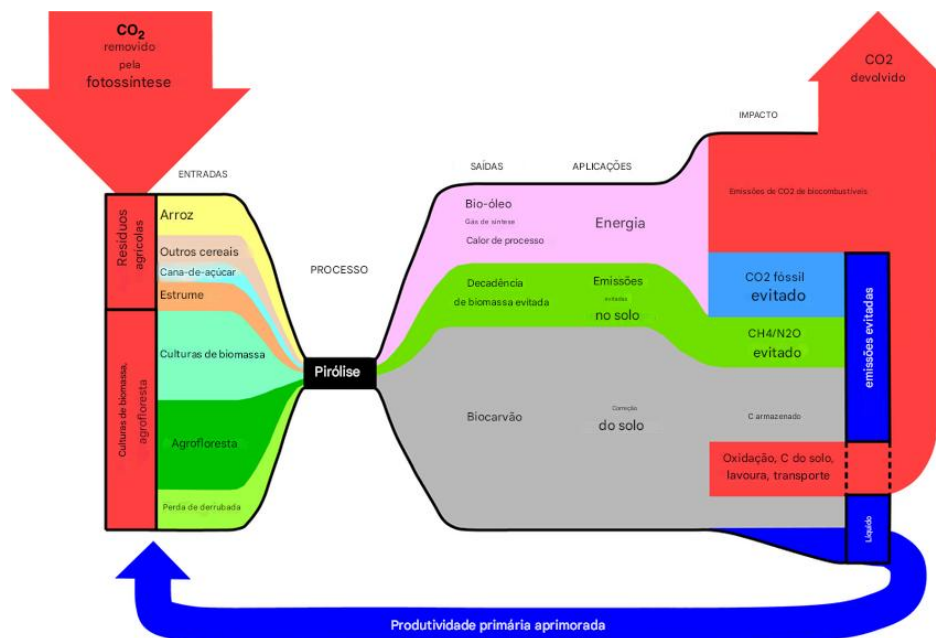
Posição	País	Produção (toneladas)	Consumo Per Capita (kg/ano)
1	China	208.064.200	146.63
2	Índia	206.727.000	142.47
3	Bangladesh	58.613.458	336.86
4	Indonésia	53.980.993	190.75
5	Vietnã	43.497.625	434.98
6	Tailândia	33.070.957	465.79
7	Myanmar	25.650.000	500.00
8	Filipinas	20.059.562	174.43
9	Paquistão	14.803.800	58.98
10	Camboja	12.900.000	758.82
11	Brasil	10.285.663	48.52
12	Japão	10.136.000	81.74
13	Estados Unidos	9.901.510	28.70
14	Nigéria	8.902.200	38.21
15	Nepal	5.724.200	190.81

Fonte: worldostats. 2025.

N.B: “Consumo Per Capita” significa a quantidade média de arroz consumida por pessoa em um país

Um estudo de grande relevância conduzido por Woolf *et al.* (2010) investigou o potencial técnico do biochar como estratégia sustentável para mitigação das mudanças climáticas. Nesse trabalho, os autores apresentam uma abordagem integrada do conceito de biochar sustentável, ilustrada na Figura (3), na qual demonstram como a conversão de biomassa em biochar e sua aplicação no solo podem contribuir para a redução das emissões de gases de efeito estufa e para o sequestro de carbono em longo prazo.

Figura 3: Estrutura conceitual do sistema biochar-clima.



Fonte: Adaptado de Woolf *et al.* (2010).

2. OBJETIVOS

2.1. Geral

- Avaliar o efeito da substituição parcial do cimento Portland pelo biochar de casca de arroz, nas proporções de 1%, 5% e 10%, sobre a durabilidade e as propriedades físicas e mecânicas de uma argamassa de referência (traço 1:3) e de um concreto convencional de uso estrutural ($f_{ck} \approx 25$ MPa, traço 1:2:3), produzidos e curados em condições controladas de laboratório (temperatura de $23 \pm 2^\circ\text{C}$, umidade relativa $\geq 95\%$ e cura úmida padronizada aos 7, 28 e 56 dias).

2.2 Específicos

- Investigar a influência de diferentes teores de biochar de casca de arroz no comportamento de matrizes cimentícias;
- Avaliar as propriedades no estado fresco, com foco na consistência (slump test./espalhamento) e massa específica;
- Avaliar a influência do biochar nas propriedades físicas e mecânicas no estado endurecido;
- Examinar o impacto da incorporação de biochar nos indicadores de durabilidade das misturas;
- Identificar o teor ótimo de biochar capaz de melhorar o desempenho físico-mecânico e ambiental.

3. REFERÊNCIA

- ABDUL RAHIM, Mustaqqim et al. Properties of concrete with different percentange of the rice husk ash (RHA) as partial cement replacement. In: **Materials Science Forum**. Trans Tech Publications Ltd, 2015. p. 288-293. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/MSF.803.288>
- Brewer, C. E., & Brown, R. C. (2012). Biochar. *Comprehensive Renewable Energy*, 5, 357–384. <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-087872-0.00524-2>
- Castro, A. M. N. de. (2013). Mecanismos de Decomposição Pirolítica de Resíduos com PVC com vista à sua Valorização. Universidade do Minho.
- CHEN, Ling et al. A review on the roles of biochar incorporated into cementitious materials: Mechanisms, application and perspectives. **Construction and Building Materials**, v. 409, p. 134204, 2023. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2023.134204>
- COMISSÃO EUROPEIA. *Closing the loop – An EU action plan for the Circular Economy*. Brussels: European Commission, 2015. (COM(2015) 614 final).
- COMISSÃO EUROPEIA. **COM/2020/98: Um novo Plano de Ação para a Economia Circular: Para uma Europa mais limpa e competitiva**. Bruxelas: Comissão Europeia, 2020. Disponível em: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/PT/TXT/?uri=CELEX:52020DC0098>.
- CUNHA, Tiago Manuel Almeida. **Utilização de Resíduos em Betões e Argamassas**. 2020. Dissertação de Mestrado. Universidade de Aveiro (Portugal). <https://www.proquest.com/>
- DU, Jiang et al. Valorization of wasted-derived biochar in ultra-high-performance concrete (UHPC): pretreatment, characterization, and environmental benefits. **Construction and Building Materials**, v. 409, p. 133839, 2023. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2023.133839>
- GHISELLINI, Patrizia; CIALANI, Catia; ULGIATI, Sergio. A review on circular economy: the expected transition to a balanced interplay of environmental and economic systems. **Journal of Cleaner production**, v. 114, p. 11-32, 2016. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2015.09.007>
- GUPTA, Souradeep; KUA, Harn Wei. Effect of water entrainment by pre-soaked biochar particles on strength and permeability of cement mortar. **Construction and Building Materials**, v. 159, p. 107-125, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.10.095>
- IDREES, Sarmad et al. Automatic concrete slump prediction of concrete batching plant by deep learning. **Developments in the Built Environment**, v. 18, p. 100474, 2024. <https://doi.org/10.1016/j.dibe.2024.100474>
- IPCC. **Climate Change 2023: Synthesis Report**. Contribution of Working Groups I, II and III to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Geneva: IPCC, 2023. [IPCC_AR6_SYR_LongerReport.pdf](https://www.ipcc.ch/report/synthesis-report/)
- KIRCHHERR, Julian; REIKE, Denise; HEKKERT, Marko. Conceptualizing the circular economy: An analysis of 114 definitions. **Resources, conservation and recycling**, v. 127, p. 221-232, 2017. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2017.09.005>

Lehmann, J. and Joseph, S. (2015) Biochar for Environmental Management: Science, Technology and Implementation. Routledge, London. <https://doi.org/10.4324/9780203762264>

Lopes H. M. T.; Peçanha, A. C. C.; Castro, A. L. **Considerações sobre a eficiência de misturas de concreto de cimento Portland com base no conceito de empacotamento de partículas.** Matéria (Rio de Janeiro), [S.L.], v. 25, n. 1, p. 1-16, ago. 2020. FapUNIFESP (SciELO). <http://dx.doi.org/10.1590/s1517-707620200001.0874>.

LOPES, Marcos Antonio Pereira; JUNIOR, Alex Neves; BIANCHINI, Glauco Fabrício. Uso do biocarvão da casca de arroz em pastas de baixa relação água x cimento para captura de CO₂. **ENCONTRO LATINO-AMERICANO E EUROPEU SOBRE EDIFICAÇÕES E COMUNIDADES SUSTENTÁVEIS**, 2023. [Uso do biocarvão da casca de arroz em pastas de baixa relação água x cimento para captura de CO₂ | Encontro Latino-americano e Europeu sobre Edificações e Comunidades Sustentáveis \(euroELECS\)](https://doi.org/10.1590/s1517-707620200001.0874)

MENGESHA, Teka Tesfaye et al. Review on the influence of pyrolysis process parameters for biochar production with minimized polycyclic aromatic hydrocarbon content. **Journal of Analytical and Applied Pyrolysis**, p. 106699, 2024. <https://doi.org/10.1016/j.jaap.2024.106699>

Muthukrishnan, S., Gupta, S., & Kua, H. W. (2019). Application of rice husk biochar and thermally treated low silica rice husk ash to improve physical properties of cement mortar. **Theoretical and Applied Fracture Mechanics**, 102376. <https://doi.org/10.1016/j.tafmec.2019.102376>

SENADHEERA, Sachini Supunsala et al. Application of biochar in concrete—a review. **Cement and Concrete Composites**, v. 143, p. 105204, 2023. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2023.105204>

TAN, Kang-Hao et al. Biochar as a partial cement replacement material for developing sustainable concrete: An overview. **Journal of Materials in Civil Engineering**, v. 33, n. 12, p. 03121001, 2021. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)MT.1943-5533.0003987](https://doi.org/10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0003987)

TAN, Kanghao et al. Properties of cement mortar containing pulverized biochar pyrolyzed at different temperatures. **Construction and Building Materials**, v. 263, p. 120616, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.120616>

VENDITE, Gabriela Gonçalves; OLIVEIRA, Anna Hoffmann. CARBON FARMING: POTENCIAL DE MITIGAÇÃO DAS MUDANÇAS CLIMÁTICAS EM SOLOS AGRÍCOLAS BRASILEIROS. **Revista de Geopolítica**, v. 16, n. 5, p. e993-e993, 2025. <https://doi.org/10.56238/revgeov16n5-168>

WANG, Lei et al. Biochar as green additives in cement-based composites with carbon dioxide curing. **Journal of Cleaner Production**, v. 258, p. 120678, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.120678>

WEN, Jiehuizi et al. New insights into the green cement composites with low carbon footprint: The role of biochar as cement additive/alternative. **Resources, Conservation and Recycling**, v. 197, p. 107081, 2023. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2023.107081>

WOOLF, Dominic et al. Sustainable biochar to mitigate global climate change. **Nature communications**, v. 1, n. 1, p. 56, 2010. <https://doi.org/10.1038/ncomms1053>

XIAO, J. et al. **Machine learning (ML) and deep learning (DL) in sustainable concrete construction: review, trend and gap analyses**. *Journal of Asian Architecture and Building Engineering*, v. 24, n. 1, p. 257-457, 2025. <https://doi.org/10.1080/13467581.2025.2574571>.

ZULFIQAR, Faisal et al. Biochar: An emerging recipe for designing sustainable horticulture under climate change scenarios. **Frontiers in Plant Science**, v. 13, p. 1018646, 2022. <https://doi.org/10.3389/fpls.2022.1018646>

4. CAPÍTULO I – ARTIGO

AVALIAÇÃO DO BIOCHAR DA CASCA DE ARROZ COMO MATERIAL CIMENTÍCIO SUPLEMENTAR EM ARGAMASSAS E CONCRETO DE CIMENTO PORTLAND.

RESUMO

O setor da construção civil é um dos maiores emissores de CO₂, sendo a produção de cimento responsável por 8% dessas emissões. Este estudo avaliou o uso do biochar de casca de arroz (BCA) como substituto parcial do cimento na produção de concretos e argamassas ecoeficientes. Inicialmente, o ensaio de atividade pozolânica (ABNT NBR 5752), com 25% de substituição, revelou o índice de 176,37%, superando amplamente o limite mínimo normativo de 75% e comprovando o potencial químico do BCA. Em seguida, foram moldadas matrizes de concreto e argamassa com teores de 1%, 5% e 10% de BCA, avaliando-se a resistência à compressão axial e a absorção de água por capilaridade (ABNT NBR 9779) aos 7, 28 e 56 dias. Nas idades iniciais (7 dias), os traços com 5% e 10% de BCA aumentaram a absorção de água devido à porosidade intrínseca do carvão bruto em uma matriz ainda jovem. Por outro lado, o teor de 1% mostrou-se semelhante à referência (0% BCA) desde o início. No desempenho mecânico do concreto, o traço com 5% de BCA obteve o melhor equilíbrio, consolidando uma resistência à compressão de 46, 65MPa. Aos 56 dias de cura, ocorreu queda acentuada na absorção de água e uma forte convergência de todos os traços com biochar (1%, 5% e 10%), que atingiram níveis de estanqueidade equivalentes aos das misturas comuns. Esse resultado confirma que o tempo ativou a reação pozolânica tardia da sílica amorfa do BCA junto ao efeito *filler*, gerando cristais que preencheram os poros internos do carvão e bloquearam a entrada de água. Como diferença, as argamassas mostraram uma cinética de absorção inicial ligeiramente mais homogênea que os concretos devido ao maior volume de pasta.

Conclui-se que o biochar de casca de arroz é uma alternativa técnica e ambientalmente viável para concretos e argamassas. Embora exija atenção com a permeabilidade nos primeiros dias, a atividade pozolânica aos 56 dias corrige esse efeito, entregando materiais resistentes e estanques, além de promover a redução da pegada de carbono através da valorização de um subproduto agroindustrial.

Palavras-chave: Biochar de casca de arroz; Concreto; Argamassa; Absorção por capilaridade; Resistência à compressão; Atividade pozolânica.

ABSTRACT

The construction sector is one of the largest CO₂ emitters, with cement production accounting for about 8% of these emissions. This study evaluated the use of rice husk biochar (RHB) as a partial cement replacement to produce eco-efficient concrete and mortar. Initially, the pozzolanic activity test (ABNT NBR 5752), with a 25% replacement, showed an index of 176.37%, widely exceeding the minimum standard limit of 75% and proving the chemical potential of RHB. Next, concrete and mortar matrices were molded with 1%, 5%, and 10% RHB content to evaluate axial compressive strength and water absorption by capillarity (ABNT NBR 9779) at 7, 28, and 56 days. At early ages (7 days), the mixes with 5% and 10% RHB increased water absorption due to the natural porosity of the raw biochar in a still young matrix. On the other hand, the 1% content performed similarly to the reference mix (0% RHB) from the beginning. In the mechanical performance of the concrete, the mix with 5% RHB achieved the best balance, reaching a compressive strength of 46.65 MPa. At 56 days of curing, there was a sharp drop in water absorption and a strong convergence of all biochar mixes (1%, 5%, and 10%), which reached water-tightness levels equivalent to those of the conventional mixtures. This result confirms that time activated the late pozzolanic reaction of the amorphous silica in the RHB along with the filler effect, generating crystals that filled the internal pores of the biochar and blocked water entry. As a difference, the mortars showed slightly more homogeneous initial absorption kinetics than the concrete due to the higher paste volume. In conclusion, rice husk biochar is a technically and environmentally viable alternative for concrete and mortar. Although it requires attention regarding permeability in the first days, the pozzolanic activity at 56 days corrects this effect, delivering resistant and water-tight materials, while reducing the carbon footprint by repurposing an agroindustrial byproduct.

Keywords: Rice husk biochar. Concrete. Mortar. Capillary absorption. Compressive strength. Pozzolanic activity.

4.1 Introdução

O setor da construção é um dos mais importantes em termos de consumo de energia e emissões de gases de efeito estufa, representando a cerca de 36% do consumo mundial de energia e 39% das emissões de CO₂, segundo a Agência Internacional de Energia (AIE). Nesse contexto, o concreto destaca-se como o material de construção mais utilizado no mundo, desempenhando um papel Muthukrishnan *et al.*, 2019). No entanto, sua produção está diretamente associada ao elevado consumo de recursos naturais e a emissões significativas de carbono, principalmente em razão da fabricação do cimento Portland, responsável por 7% a 8% das emissões globais de essencial no desenvolvimento de infraestruturas modernas (SCRIVENER *et al.*, 2018; CO₂ (SCRIVENER *et al.*, 2018; LEHNE *et al.*, 2018).

Além disso, a urbanização acelerada, como se observa em várias regiões do Brasil, intensificou a demanda por materiais cimentícios, agravando os impactos ambientais associados ao setor da construção civil (IBGE, 2024). Nesse contexto, tanto as argamassas quanto os concretos, amplamente utilizados em aplicações estruturais e não estruturais, revestem-se de grande importância funcional, mas apresentam também forte dependência do cimento, tornando importante a busca por alternativas mais sustentáveis.

Diante desse desafio, o uso de materiais cimentícios suplementares (MCS), tais como cinzas volantes, resíduos de alto-forno e sílica ativa, tem sido objeto de numerosas pesquisas como forma de reduzir a pegada de carbono, ao substituir parcialmente o clínquer e melhorar as propriedades mecânicas e a durabilidade dos compostos cimentícios (Tutikian *et al.*, 2011). Nesse contexto, o biochar, um material rico em carbono obtido por pirólise da biomassa a temperaturas entre 400 e 600°C, surge como alternativa promissora (BRIDGWATER, 2003).

Devido à elevada porosidade e grande área superficial, o biochar pode atuar como agente de reforço e endurecimento interno na matriz cimentícia, influenciando positivamente o desempenho mecânico e a durabilidade dos materiais. Além disso, apresenta potencial de sequestro de carbono e é considerado um material com pegada de carbono negativa (TAN *et al.*, 2022). Estudos recentes demonstram que sua incorporação pode melhorar as propriedades mecânicas e reduzir as emissões de CO₂, embora seu desempenho dependa de fatores como a matéria-prima, as condições de produção e a dosagem utilizada (Gupta *et al.*, 2021; Akhtar e Sarmah, 2018; MALJAE *et al.*, 2021).

Entretanto, ainda existem lacunas consideráveis no que diz respeito à interação entre biochars altamente porosos e ligantes de alta reatividade. A maioria dos estudos utiliza cimentos compostos convencionais, enquanto as pesquisas sobre cimentos de alta resistência inicial, como o CP V-ARI, ainda permanecem limitadas. Esse tipo de cimento, caracterizado por uma

granulometria fina e alto teor de clínquer, permite isolar com maior precisão os efeitos do biochar, especialmente em relação à cinética de hidratação e ao seu potencial como agente de endurecimento interno.

No contexto brasileiro, vale ressaltar a importância da valorização de resíduos agroindustriais, como a casca de arroz, cuja produção gera grandes volumes de resíduos frequentemente descartados de forma inadequada, que contribui para a emissão de gases poluentes (Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária, 2023). A conversão desses resíduos em biocarvão representa uma estratégia alinhada aos princípios da economia circular e da sustentabilidade no setor da construção civil.

Diante disso, o presente estudo tem como objetivo avaliar a viabilidade da incorporação de biochar de casca de arroz como substituto parcial do cimento Portland em argamassas e concretos, em teores de 1%, 5% e 10%. Foram analisadas propriedades mecânicas, como resistência à compressão e densidade, bem como propriedades relacionadas à durabilidade, como a absorção de água por capilaridade, em diferentes idades (7, 28 e 56 dias), conforme as normas ABNT NBR 7215 (ABNT, 2019), NBR 9778 (ABNT, 2005) e NBR 9779 (ABNT, 2012).

Ao integrar a elevada reatividade do cimento CP V-ARI com o potencial funcional do biochar, esta pesquisa busca contribuir para o desenvolvimento de compósitos cimentícios de alto desempenho e baixo impacto ambiental, alinhados às demandas contemporâneas por sustentabilidade no setor da construção civil.

4.2 Materiais

Os materiais utilizados neste estudo, tanto para a preparação das argamassas quanto dos concretos, são descritos a seguir:

(a) Cimento: utilizou-se cimento Portland de alta resistência inicial (CP V-ARI), fornecido pela CIPLAN e classificado como «CPV Extra Forte Industrial». Suas propriedades físicas e químicas estão em conformidade com os requisitos da norma NBR 16697 (ABNT). A escolha desse cimento justifica-se pelo alto consumo de energia, evidenciando a necessidade de encontrar alternativas mais sustentáveis.

(b) Biochar: o biochar foi produzido a partir de cascas de arroz, pelo processo de pirólise a 400°C durante 15 minutos, e posteriormente micronizado. Este material foi obtido em colaboração com o Departamento de Engenharia Civil da Universidade Federal do Mato Grosso (UFMT).

(c) Água: Água potável (H₂O), fornecida pela SANEAGO (Goiás), foi utilizada em todas as misturas.

(d) Aditivo químico: um superplastificante de alto desempenho (SUPER BMX 12 ARI), à base de polímeros de éteres policarboxílicos modificados, foi utilizado com o objetivo de melhorar a trabalhabilidade sem alterar a relação água/cimento.

(e) Agregado miúdo: Foi utilizada areia natural de origem fluvial como agregado miúdo tanto nas argamassas quanto nos concretos. Para as argamassas, adotou-se uma areia média com módulo de finura de 2,10, conforme as normas NBR NM 248 (ABNT, 2003) e NBR 7211 (ABNT, 2009). Para os concretos, o agregado miúdo apresentou módulo de finura de 2,49, sendo igualmente classificado como areia média, em conformidade com as especificações normativas.

(f) Agregado graúdo: Para os concretos, foram utilizados dois tipos de agregado graúdo: brita 0 (pedrisco) e brita 1, sendo esta última responsável por proporcionar maior resistência mecânica devido à sua granulometria.

4.3 Método

As propriedades químicas e físicas foram estudadas por meio de testes laboratoriais no Instituto Federal Goiano, campus Rio Verde/GO.

(a) A Tabela (5) apresenta os métodos utilizados para a caracterização da areia. Os ensaios foram realizados conforme normas da ABNT, sendo adotado o mesmo procedimento para as areias utilizadas em argamassas e concretos, garantindo a comparabilidade dos resultados.

Tabela 5: Caracterização do agregado miúdo (areia).

Propriedade	Método/Norma	Descrição
Granulometria	NBR 17054 (ABNT, 2022)	Determinação da composição granulométrica dos agregados finos e grossos destinados à argamassa e ao concreto de cimento Portland.
Módulo de finura	NBR 7217 (ABNT, 2021)	Índice representativo da granulometria dos agregados miúdo.
Massa específica	NBR 9776 (ABNT, 1986)	Determinação da massa por unidade de volume dos agregados finos utilizando o frasco de Chapman.
Método experimental	-	Mesmo procedimento aplicado às areias utilizadas em argamassas e concretos.

A massa específica do agregado miúdo foi calculada conforme a Equação (1)

$$\gamma = \frac{500}{L-200} \quad (\text{Equação 1})$$

Em que:

γ = massa específica do agregado miúdo (g/cm^3);

L = leitura do frasco (volume ocupado pela mistura água + agregado miúdo).

(b) O biochar utilizado neste estudo foi obtido a partir de cascas de arroz, por meio de um processo de pirólise realizado a 400°C durante 15 minutos, em ambiente com baixo teor de oxigênio. Uma vez obtido, o material foi seco em estufa a 105°C por 24 horas, a fim de eliminar a umidade residual, e depois peneirado com malha de $150\ \mu\text{m}$, com o objetivo de uniformizar a granulometria e melhorar a dispersão na matriz cimentícia.

Em seguida, o biochar foi caracterizado quanto à sua composição química por meio de fluorescência de raios X (XRF) realizadas em um espectrômetro WDS Bruker S8 Tiger, equipado com tubo de Rh. Para análise dos elementos maiores, a calibração foi realizada com o pacote GeoQuant M® da Bruker composto por padrões de rochas e minerais naturais. Os valores obtidos para os óxidos maiores estão representados em porcentagem (%) de massa, em base úmida.

Complementarmente, foram realizadas análises termogravimétricas (TG) e termogravimetria derivada (DTG) para avaliar o comportamento térmico e a estabilidade oxidativa do material. Os ensaios foram conduzidos no Laboratório de Caracterização de Novos Materiais (LACANM), utilizando-se um analisador térmico simultâneo, modelo PerkinElmer STA 8000. As amostras, com massa aproximada de 10 mg, foram acondicionadas em cadinhos de platina e submetidas a taxa de aquecimento de $10^\circ\text{C}/\text{min}$, em uma faixa de temperatura de 30°C a 1000°C . Para garantir as condições de oxidação, utilizou-se atmosfera de ar sintético com vazão constante de 100 ml/min.

A morfologia superficial e a microestrutura do biochar de casca de arroz foram investigadas por meio de microscopia eletrônica de varredura (MEV), utilizando-se um microscópio Zeiss, modelo EVO MA10. Previamente à análise, as amostras foram secas em estufa a 105°C e moídas até granulometria inferior a $75\ \mu\text{m}$. Posteriormente, foram fixadas em suportes de alumínio com fita de carbono de dupla face e submetidas ao processo de metalização com ouro para garantir a condutividade necessária. As micrografias foram obtidas no modo de elétrons secundários, sob aumento de $250\times$, permitindo a observação da estrutura porosa característica do material.

A viabilidade técnica do biochar como material pozolânico foi avaliada por meio do ensaio de Índice de Atividade Pozolânica (IAP), conforme norma NBR 5752 (ABNT, 2014).

A Tabela (6) apresenta a composição das argamassas e as condições experimentais adotadas no ensaio de Índice de Atividade Pozolânica.

Tabela 6: Parâmetros do ensaio de Índice de Atividade Pozolânica.

Parâmetro	Argamassa A (Referência)	Argamassa B (com biochar)
Cimento	CP V-ARI	75% CP V-ARI
Biochar	0%	25%
Areia	Areia normalizada	Areia normalizada
Água	Mesma proporção	Mesma proporção
Número de corpos de prova	4	4
Dimensões dos corpos de prova	50 mm × 100 mm	50 mm × 100 mm
Idade de ensaio	28 dias	28 dias
Objetivo	Referência	Avaliação do IAP

O índice de desempenho com cimento Portland aos 28 dias foi determinado conforme a Equação (2).

$$I_{\text{cimento}} = \frac{f_{cB}}{f_{cA}} \times 100 \quad (\text{Equação 2})$$

Em que: I_{cimento} é o índice de desempenho do cimento Portland aos 28 dias, expresso em porcentagem

f_{cB} = resistência média aos 28 dias dos corpos de prova contendo 25% de material pozolânico (Argamassa B), expressa em MPa;

f_{cA} = resistência média aos 28 dias dos corpos de prova de referência (Argamassa A), expressa em MPa.

(c) Após a determinação do IAP, iniciou-se a etapa experimental de produção das argamassas, considerando diferentes teores de substituição parcial do cimento por biochar. A preparação das argamassas foi realizada em argamassadeira mecânica de eixo planetário, conforme os procedimentos estabelecidos pela Associação Brasileira de Normas Técnicas NBR 7215 (ABNT, 2019), garantindo a adequada homogeneização dos materiais. As diferentes formulações foram definidas com base nos teores de substituição parcial do cimento por biochar.

A Tabela (7) apresenta os ensaios realizados para a caracterização das propriedades físicas e mecânicas das argamassas, incluindo a avaliação da trabalhabilidade, absorção de água, densidade, porosidade e resistência mecânica.

Tabela 7: Ensaios realizados nas argamassas.

Propriedade	Norma	Descrição	Equação
Espalhamento	NBR 13276 (ABNT)	Avaliação da trabalhabilidade da argamassa no estado fresco.	—
Absorção por capilaridade	NBR 9779 (ABNT, 2005)	Absorção de água por sucção capilar.	Eq. 3
Massa específica aparente (ρ)	NBR 9778 (ABNT, 2005)	Relação entre massa seca e volume.	Eq. 4
Índice de vazios (IV)	NBR 9778 (ABNT, 2005)	Relação entre volume de vazios e volume total.	Eq. 5
Resistência à compressão	NBR 7215 (ABNT, 2019)	Resistência mecânica aos 28 dias.	Eq. 6

A absorção foi calculada conforme a Equação (3).

$$C = \frac{A-B}{S} \quad (\text{Equação 3})$$

Em que:

C = absorção de água por capilaridade (g/cm²); A = massa do corpo de prova após permanecer com uma das faces em contato com a água por um período especificado (g); B = massa do corpo de prova seco (g); S = área da seção transversal (cm²).

A Massa Específica foi calculada conforme a Equação (4).

$$\rho = \frac{m_{seca}}{v} \quad (\text{Equação 4})$$

Em que:

P = massa específica aparente (g/cm³ ou kg/m³); m_{seca} = massa do corpo de prova seco (g ou kg); V = volume do corpo de prova (cm³ ou m³).

A relação entre o volume de poros permeáveis e o volume total da amostra foi calculada conforme a Equação (5).

$$Iv = \frac{m_{sat}-m_s}{m_i} \times 100 \quad (\text{Equação 5})$$

Em que:

m_i = massa da amostra saturada imersa em água após a fervura; m_{sat} = massa da amostra saturada após imersão e fervura; m_s = massa da amostra seca em estufa.

A resistência à compressão foi calculada com base na equação (6).

$$\sigma = \frac{F}{A} \quad (\text{Equação 6})$$

Em que:

σ = tensão de compressão (MPa); F = carga máxima aplicada (N); A = área da seção transversal do corpo de prova (mm²).

(d) Concreto: A Tabela (8) apresenta as etapas de preparação, moldagem e cura dos corpos de prova de concreto, conforme os procedimentos adotados neste estudo.

Tabela 8:Preparação, moldagem e cura dos corpos de prova.

Etapa	Procedimento
Equipamento	Betoneira elétrica MAQTRON-M150 (150 L, motor 1/2 HP).
Mistura	Realizada conforme NBR 12655.
Ajustes	Correção de água e aditivo devido à absorção do biochar.
Consistência	Ensaio de abatimento (slump test.).
Moldagem	Corpos de prova cilíndricos (100 mm × 200 mm).
Cura inicial	24 h em câmara úmida.
Cura final	Imersão em água até as idades de ensaio.

A Tabela (9) apresenta os ensaios realizados para a avaliação da trabalhabilidade, do desempenho mecânico e da durabilidade dos concretos produzidos. Os ensaios foram conduzidos conforme as normas técnicas vigentes, assegurando a confiabilidade e a reprodutibilidade dos resultados experimentais.

Tabela 9:Ensaos realizados no concreto.

Ensaio	Norma / Método	Descrição resumida	Idades (dias)	Equação
Abatimento (Slump test.)	NBR 16889(ABNT 2020)	Avaliação da trabalhabilidade do concreto no estado fresco.	—	—

Resistência à compressão	NBR 5738(ABNT 2015) / NBR 5739(ABNT 2018)	Ensaio de compressão axial em corpos de prova cilíndricos capeados.	7, 28 e 56	Eq. 7
Absorção por capilaridade	NBR 9779	Determinação da absorção de água por sucção capilar (contato parcial com água).	7, 28 e 56	Eq. 8

As cargas de ruptura determinadas experimentalmente (em toneladas-força) foram convertidas em resistência à compressão (MPa) utilizando a Equação (7).

$$\sigma = \frac{F \times 9.81}{A} \quad \text{Equação (7).}$$

Em que:

σ = resistência à compressão (MPa); F = carga de ruptura (tf); A = área da seção transversal da amostra de ensaio (mm²).

A absorção de água por capilaridade foi calculada com base na equação (8).

$$C = \frac{A-B}{S} \quad \text{Equação (8).}$$

Em que:

- C = absorção de água por capilaridade, em g/cm²;
- A = massa da amostra de ensaio que permanece com uma face em contato com a água por um período especificado, em g;
- B = massa da amostra de ensaio seca, após atingir a temperatura de (23 ± 2)°C, em g;
- S = área da seção transversal, em cm².

A Figura (4) apresenta os corpos de prova após o capeamento das superfícies e a prensa manual FT Forest (modelo FT02) utilizada nos ensaios de compressão, garantindo condições adequadas para a aplicação uniforme da carga durante o ensaio de compressão.

Figura 4:Corpos de prova capeados e prensa utilizada no ensaio de compressão.

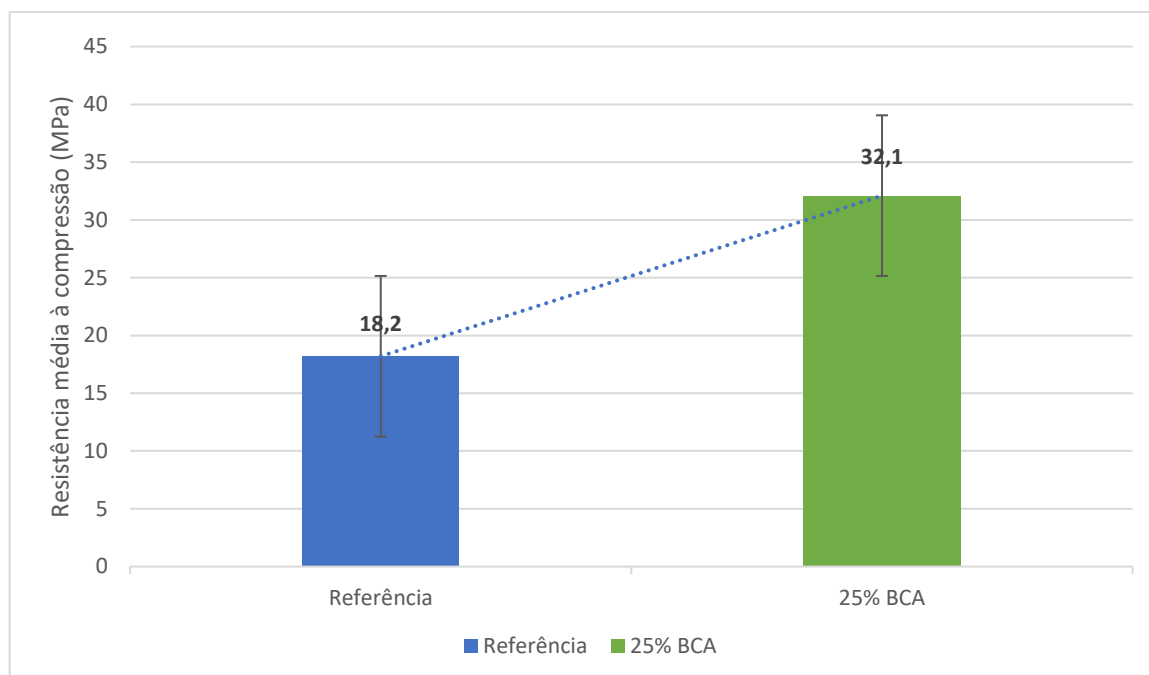


4.4 Resultados e Discussões

I. Resultados de Atividade Pozolânica

A figura (5) mostra o gráfico que compara a resistência à compressão (MPa) das argamassas de referência (0%) e daquelas em que 25% do cimento foi substituído por biochar. As barras de erro indicam o desvio padrão dos resultados, enquanto os valores mostrados nas colunas referem-se à média.

Figura 5: Resistência à compressão das argamassas para determinação do índice de atividade pozolânica (IAP), conforme ABNT NBR 5752.



A análise dos ensaios de compressão simples evidência uma resistência média de 32,1 MPa para os corpos de prova contendo biochar, em comparação com 18,2 MPa para a argamassa de referência. Além disso, o índice de atividade pozolânica (IAP) calculado a partir desses resultados atinge 176,37%, superando amplamente o limite de 75% exigido pelas normas de certificação de materiais pozolânico. Esse desempenho pode ser explicado pela sinergia entre a reatividade química da sílica amorfa e a eficiência física do biochar em criar uma estrutura mais compacta e menos porosa do que a argamassa de referência, conforme discutido por Gupta *et al.* (2019).

II. Composição química do Biochar

A composição química do biochar de casca de arroz foi determinada por Fluorescência de Raios X (FRX), sendo os resultados expressos em termos de porcentagem em massa de óxidos, conforme apresentado na Tabela (10).

Tabela 10: Composição química do biocarvão.

Componentes	Biochar (%)
SiO ₂	39.83
TiO ₂	<LQ
Al ₂ O ₃	0.15
Fe ₂ O ₃	0.30
MnO	0.14
MgO	0.15
CaO	0.30

Na ₂ O	<QL
K ₂ O	0.73
P ₂ O ₅	0.17
SO ₃	<QL
LOI	58.23
Total	100

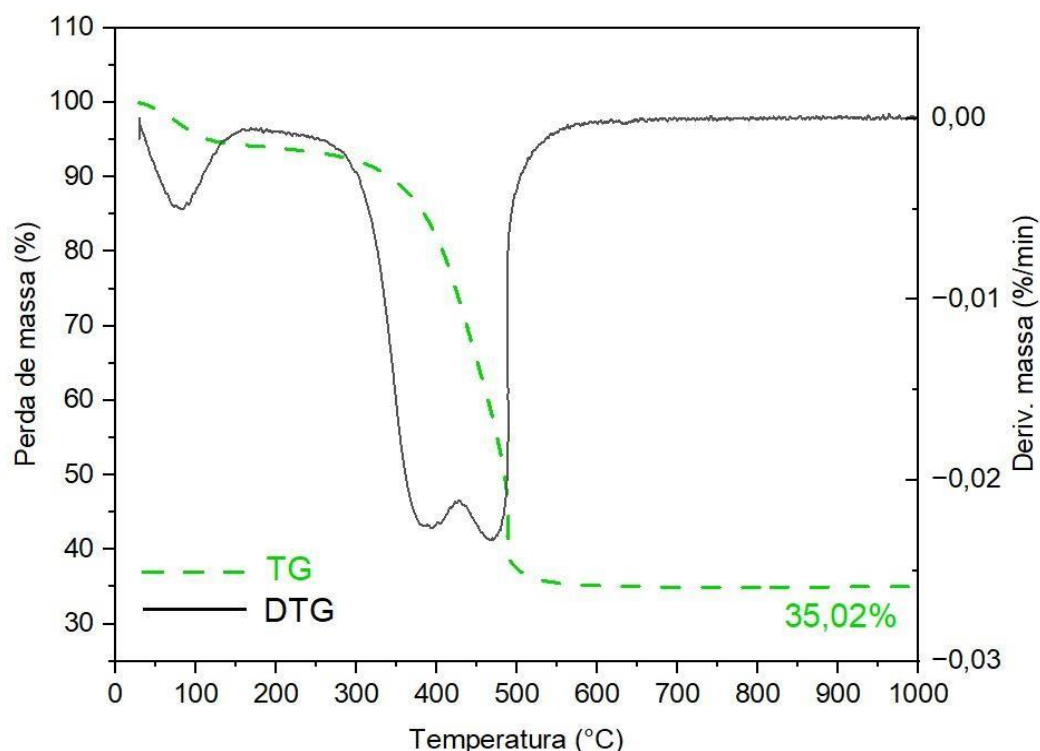
(<LQ) = Abaixo do limite qualificável.

Comparando os resultados da FRX com os de Gupta *et al.* (2018), observa-se que o biochar em estudo apresenta um teor de sílica (SiO₂ = 39,83%) que favorece a formação de produtos de hidratação secundários. Embora a literatura frequentemente se concentre na porosidade física do biochar, a análise química elementar aqui apresentada confirma que o material possui potencial químico ativo. A elevada perda por combustão (58,23%), embora possa parecer um entrave do ponto de vista dos padrões de cinzas minerais, é defendida por Muthukrishnan *et al.* (2019) como evidência da preservação da matriz de carbono, responsável por sustentar a cura interna e melhorar a Zona de Transição Interfacial durante os ensaios mecânicos.

III. Termogravimétrica e termogravimétrica derivativa

As curvas termogravimétricas (TG) e derivadas (DTG) do biochar de casca de arroz, apresentadas na Figura (6), mostram três estágios distintos de perda de massa.

Figura 6: Curva TG/DTG do biochar de casca de arroz.



Os resultados de TG e DTG obtidos para o biochar de casca de arroz demonstram uma perda de massa total de 35,02%. Este comportamento é corroborado por Tan *et al.* (2021) e Singh *et al.* (2025), que atribuem o primeiro pico (infra 150°C) à umidade adsorvida e a zona de maior atividade (200°C – 400°C) à decomposição de frações de hemicelulose e celulose remanescentes do processo de pirólise. A estabilização da massa acima de 500°C confirma a robustez térmica do material, característica típica de biochars ricos em sílica, conforme discutido por Mengesha *et al.* (2024).

IV. Morfologia da superfície do biochar de casca de arroz observada por microscópio eletrônico de varredura (SEM)

A análise por MEV (Figura 7) revela que o biochar não é apenas um resíduo carbonizado, mas uma rede complexa de arquitetura celular preservada. Essa morfologia, rica em canais vasculares e rugosidades superficiais, corrobora as observações de Gupta *et al.* (2018) sobre o papel do biochar no intertravamento mecânico da matriz. Mais do que preencher espaços, esses microcanais atuam como 'pulmões hídricos' que sustentam a hidratação do cimento CP V-ARI, mitigando a retração autógena e promovendo uma microestrutura de C-S-H mais densa e contínua.

Figura 7: Imagens de SEM de biochar de casca de arroz em diferentes ampliações.

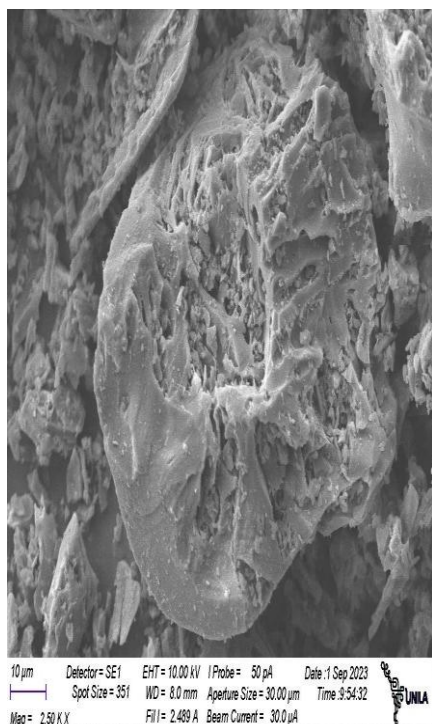


Figura: 7a

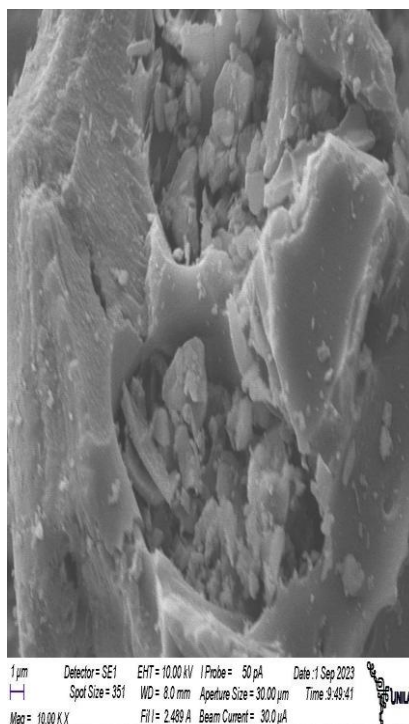


Figura: 7b

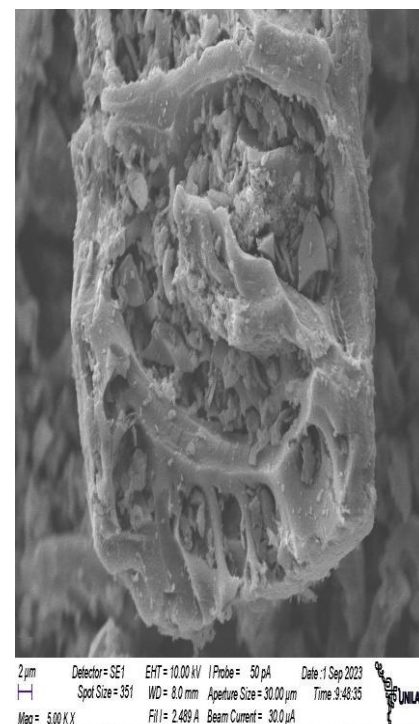


Figura: 7c

Na Figura 7a (2.500x), observa-se a morfologia macroscópica das partículas, caracterizadas por formas irregulares e uma geometria angulosa. A escala de 10 µm evidencia a integridade do esqueleto vegetal após o processo de pirólise, fornecendo o suporte estrutural necessário para a interação com a matriz cimentícia.

Ao ampliar a análise para 5.000x (Figura 7b), a porosidade torna-se o elemento central. A visualização de canais longitudinais e microcavidades comprova a existência de "micro reservatórios" hídricos, fundamentais para o mecanismo de cura interna. Nota-se, ainda, a presença de partículas submicrométricas aderidas às paredes dos poros; tal granulometria sugere que o biochar mais fino atua através do efeito fíler, preenchendo vazios capilares na pasta de cimento e refinando a estrutura de poros.

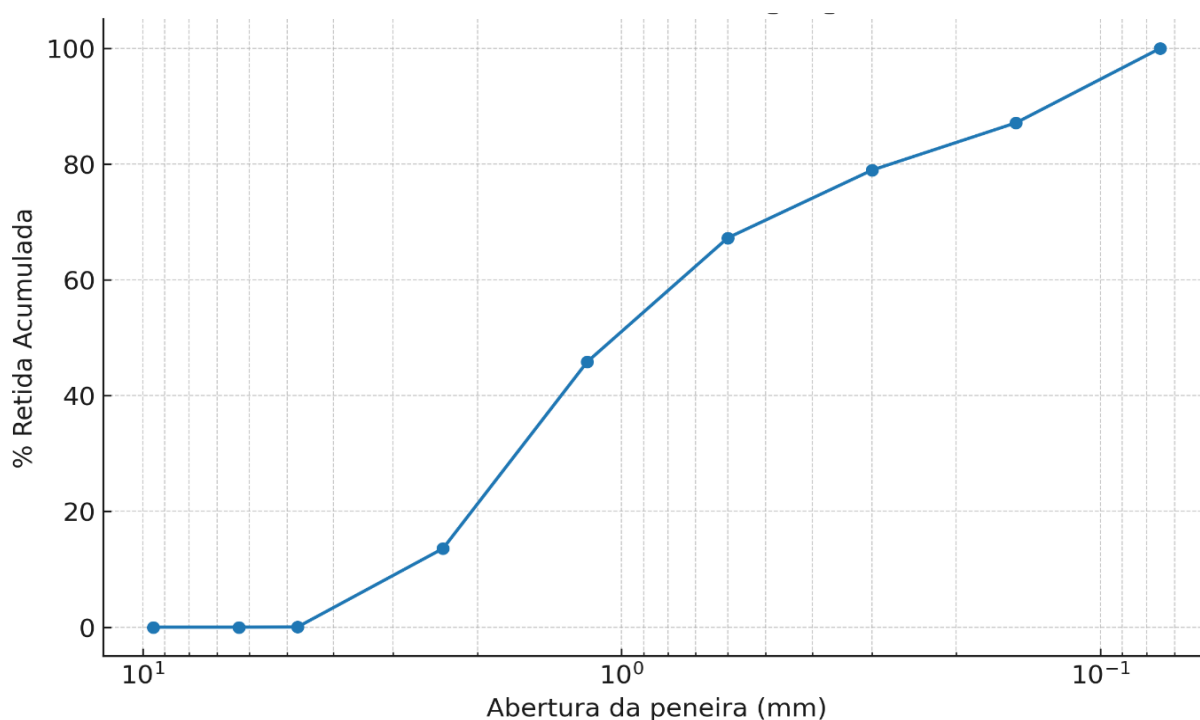
Em maior magnitude, com aumento de 10.000x (Figura 7c), o foco recai sobre a ultraestrutura das paredes porosas. A rugosidade superficial observada nesta escala de 1 µm é indicativo direto da elevada área superficial do material. Esta característica é determinante por dois motivos: (a) Ancoragem Mecânica: Proporciona uma interface de contato superior, permitindo que a pasta de cimento se engaste fisicamente nas irregularidades do biochar (ZTI);

(b) Reatividade Química: Oferece sítios ativos para a ocorrência de reações pozolânicas, favorecendo a formação de silicatos de cálcio hidratados (C-S-H) adicionais a partir da sílica amorfa disponível.

V. Resultados da Massa Específica e do Módulo de Finura da Areia

A curva granulométrica Figura (8) mostra a distribuição do material de acordo com a abertura das peneiras e destaca os principais parâmetros técnicos obtidos durante a análise, como o módulo de finura, que permitiu classificar o material, e a massa específica.

Figura 8. Curva Granulométrica do agregado miúdo.



Parâmetro	Valor
Massa específica (g/cm³)	2.63
Módulo de finura	2.10

A curva mostra uma distribuição contínua, característica de um agregado bem calibrado. O módulo de finura calculado foi de 2,10, indicando um agregado relativamente fino. De acordo com a classificação usual NBR NM 248, os agregados finos com um módulo de finura entre 2,0 e 2,3 são considerados adequados para argamassas e concretos fluidos. Esse valor prova que quanto mais fino o agregado, menor o módulo de finura.

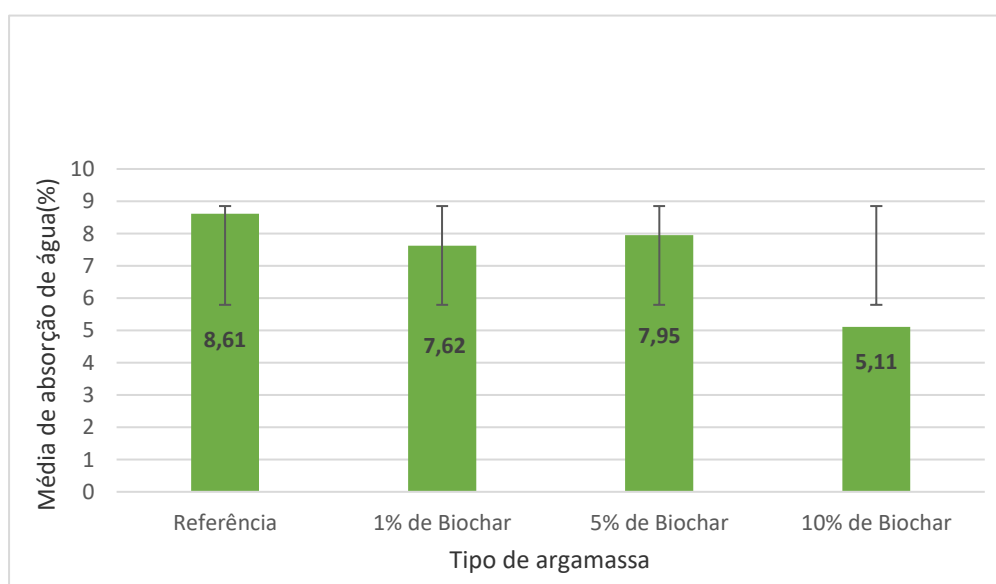
A massa específica do agregado (ABNT NBR NM 52) foi determinada como sendo 2,63 g/cm³, um valor típico para areias de sílica naturais. Esse parâmetro é importante para

dimensionar corretamente as proporções dos materiais nas misturas e para garantir a compatibilidade entre os volumes absolutos dos componentes da argamassa.

VI. Resultados de Absorção Total de Água na argamassa

Os resultados da absorção total de água, apresentados na figura (10), revelam como a introdução do biochar de casca de arroz transforma a estrutura interna da argamassa. Enquanto a amostra de referência apresentou o índice de 8,61%, as misturas com biochar mostraram uma tendência clara de redução na permeabilidade.

Figura 9. Absorção Total de Água em função do teor de biochar.



O destaque fica para o traço com 10% de substituição, em que a absorção caiu drasticamente para 5,11%. Essa redução de mais de 40% indica que o material tornou-se significativamente mais denso e "fechado". Analisando as barras de erro, percebe-se que, embora as dosagens de 1% e 5% apresentem variação maior nos resultados, o traço de 10% consolida a eficácia do biochar em bloquear a entrada de água.

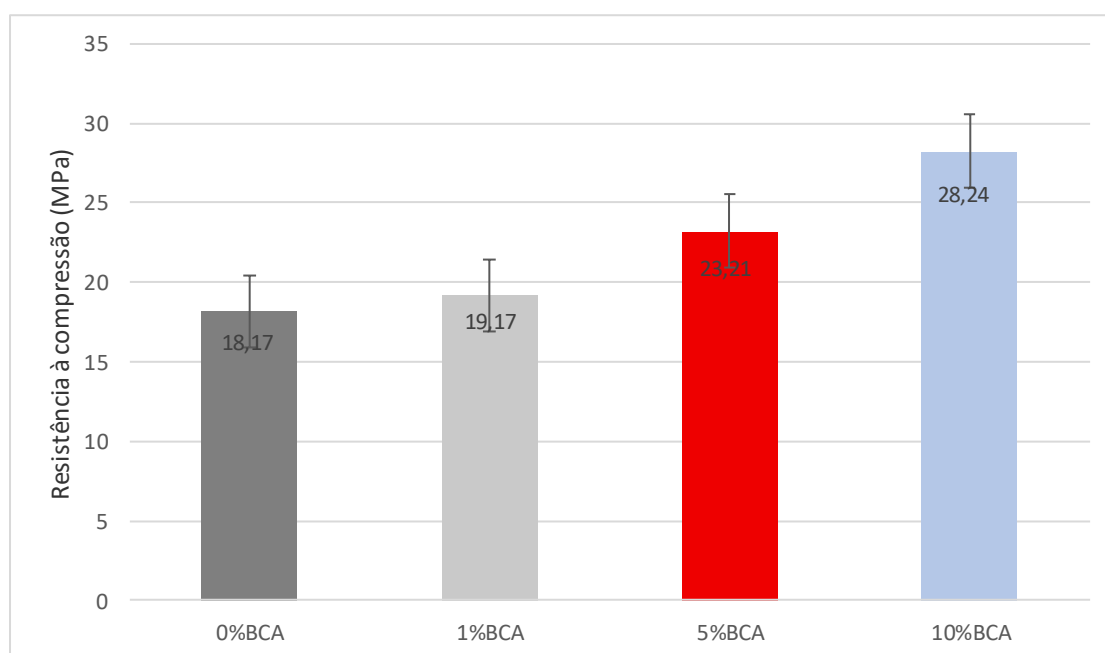
A queda acentuada observada no traço de 10% corrobora o estudo de **Aneja e Sharma (2022)**, que identificaram um "limiar de eficiência" em substituições de patamares similares. Eles explicam que, em teores muito baixos (como 1% ou 5%), o efeito de refinamento de poros pode ser disperso, mas, ao atingir 10%, a densificação da matriz torna-se contínua, reduzindo drasticamente a conectividade dos poros capilares e, consequentemente, a absorção total de água. Gupta e Kua (2018) explica também que ela acontece porque as partículas finas do

biochar preenchem os vazios entre os grãos de cimento (o chamado **efeito filler**) e, ao mesmo tempo, a sílica presente no material reage quimicamente para criar novos cristais de hidratação.

VII. Resultados de Resistência à Compressão da argamassa

Os resultados do ensaio de resistência à compressão aos 28 dias estão consolidados na figura (11). Observa-se um comportamento de crescimento linear e progressivo da resistência mecânica em função do aumento do teor de substituição do cimento por biochar de casca de arroz (BCA).

Figura 10. Resistência à compressão aos 28 dias de cura de argamassa.



A amostra de referência (0% BCA) registrou a resistência média de 18,17 MPa. Com a introdução do biochar, verificou-se um incremento sistemático no desempenho, culminando no traço com 10% de substituição, que atingiu 28,24 MPa. Este resultado representa o aumento de aproximadamente 55,4% na capacidade de carga em comparação à mistura convencional, evidenciando o potencial do BCA como material cimentício suplementar.

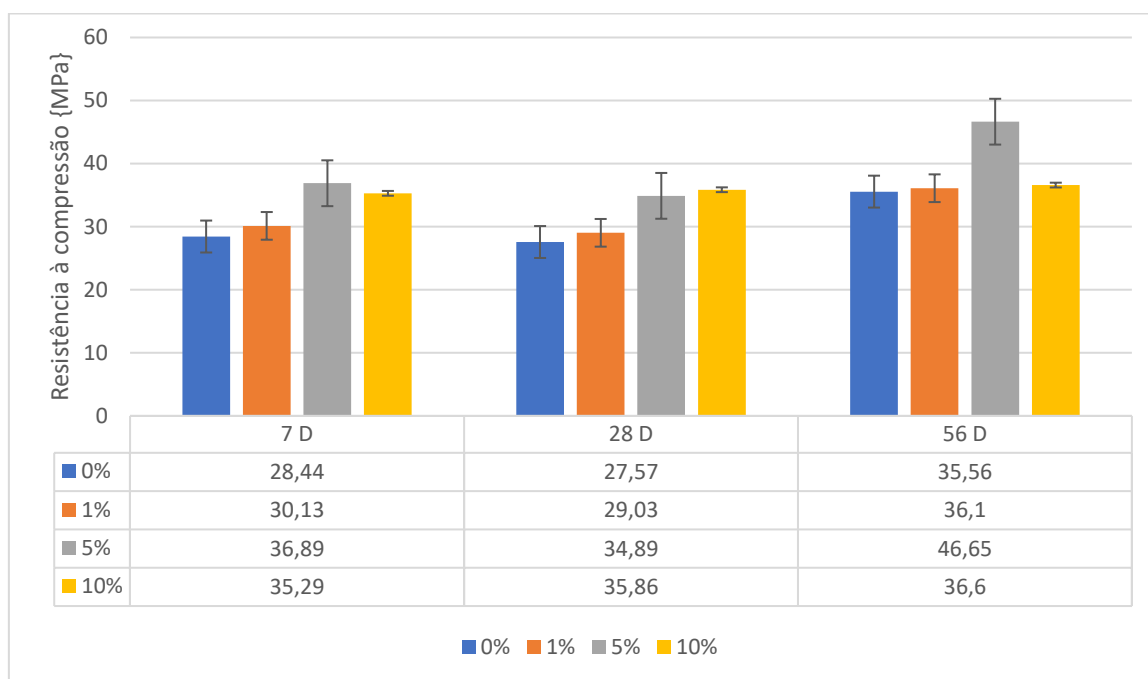
Esse aumento significativo da resistência pode ser explicado pela ação conjunta de três fatores principais. Primeiro, as partículas finas do biochar preencheram os vazios entre os grãos de cimento, tornando a matriz mais compacta e reduzindo a porosidade. Além disso, por possuir estrutura porosa, o biochar atuou como reservatório de água, liberando umidade gradualmente durante a hidratação do cimento e favorecendo a formação contínua dos produtos hidratados, como o C-S-H. Outro ponto importante foi a melhoria da zona de transição interfacial, já que a

superfície rugosa e irregular do biochar proporcionou maior aderência e intertravamento mecânico com a pasta de cimento. Dessa forma, a substituição de 10% de cimento por biochar não apenas manteve as propriedades mecânicas da argamassa, mas aumentou significativamente a resistência, além de contribuir para a construção mais sustentável com a redução do consumo de clínquer.

VIII. Resultados de Resistência à Compressão do Concreto

A Figura (11) apresenta os resultados de resistência à compressão dos concretos produzidos com diferentes teores de substituição parcial do cimento por biochar, avaliados nas idades de 7, 28 e 56 dias.

Figura 11: Resistência à Compressão do Concreto com Biochar.



A interpretação do comportamento mecânico do concreto desenvolvido neste estudo deve basear-se na premissa de que o critério de controle para as misturas foi a reologia. Ao contrário de outras abordagens que mantêm uma relação água/ligante fixa, o que muitas vezes compromete a trabalhabilidade em altas taxas de substituição; este estudo priorizou a preservação de um espalhamento constante. Esta decisão metodológica assegurou que todas as amostras apresentassem condições ideais de adensamento, eliminando variáveis espúrias decorrentes de falhas na moldagem.

Conforme evidenciado na caracterização física, o biochar de casca de arroz (BCA) possui uma área superficial elevada e uma estrutura microporosa, o que naturalmente amplia a

demanda por água de amassamento para garantir a fluidez da mistura. Contudo, é fundamental destacar que a relação entre porosidade e absorção de água, inerente à natureza do BCA, não atuou como fator de degradação da resistência, mas sim como mecanismo de otimização microestrutural.

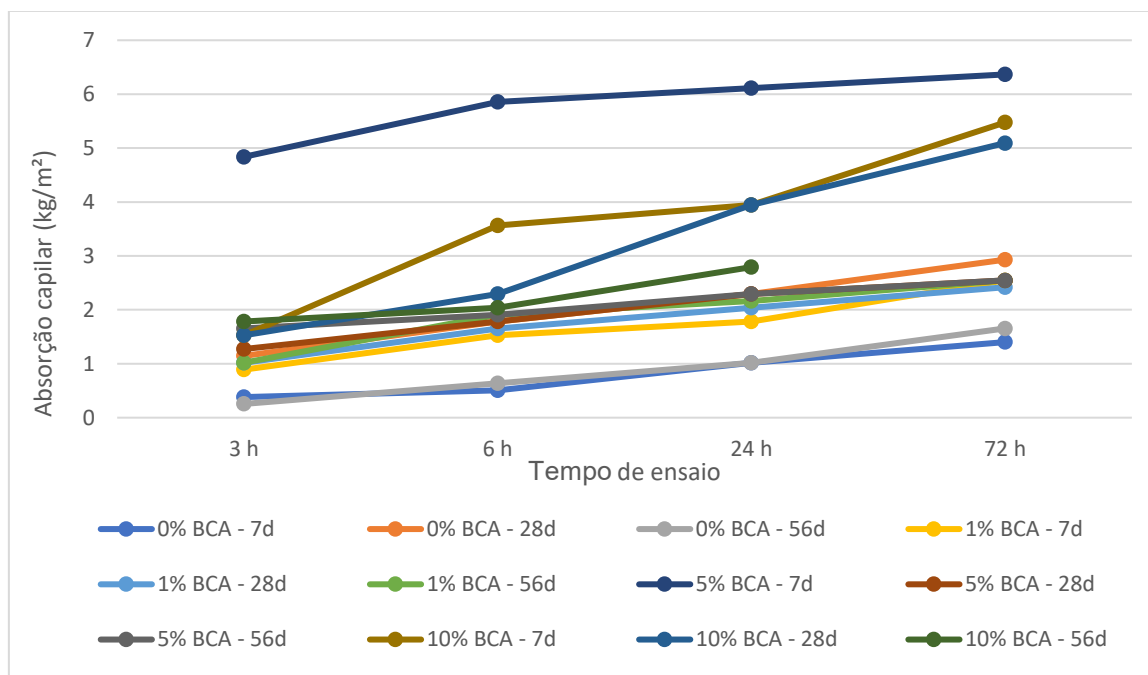
A superioridade mecânica observada, especialmente no traço com 5% de BCA (46,65 MPa aos 56 dias), fundamenta-se no fenômeno da cura interna. Durante a mistura, os poros do biochar capturaram parte da água de dosagem, impedindo que ela permanecesse livre na pasta e gerasse poros capilares prejudiciais. Com o avanço das reações de hidratação, essa umidade armazenada foi liberada gradualmente, promovendo a formação contínua de produtos de hidratação e refinando a zona de transição interfacial.

Em suma, a porosidade característica do biochar atuou como um sistema de reserva hídrica distribuída. Mesmo com a redução no consumo de cimento e o ajuste na relação água/ligante, o concreto apresentou um ganho de resistência substancial em relação à referência. Portanto, a absorção intrínseca do material não deve ser vista como limitação, mas como o fator que viabilizou uma matriz cimentícia mais densa, resistente e tecnicamente superior a longo prazo.

IX. Absorção de Água por Capilaridade do concreto

Os resultados do ensaio de absorção capilar, realizados nos intervalos de 3h, 6h, 24h e 72h, permitem avaliar a conectividade dos poros da matriz cimentícia conforme ABNT NBR 9779. A evolução da absorção de água por capilaridade para todos os traços estudados, englobando os diferentes teores de biochar de casca de arroz (BCA) e as três idades de cura (7, 28 e 56 dias), está apresentada na Figura (12).

Figura 12: Evolução da absorção de água por capilaridade para os diferentes teores de BCA e idades de cura.



Os resultados obtidos neste estudo apresentaram comportamento semelhante ao encontrado em outros trabalhos da literatura. Aos 7 dias de cura, principalmente no concreto com 5% de BCA, foi observada maior absorção de água por capilaridade. Esse comportamento também foi observado por Gupta *et al.* (2019), que explicam que o biochar possui elevada porosidade, facilitando a entrada de água no concreto nas primeiras idades de cura, quando a matriz cimentícia ainda não está totalmente densificada.

Por outro lado, aos 56 dias de cura, observou-se redução da absorção capilar e maior estabilização dos resultados. Esse comportamento está de acordo com os estudos de Dixit *et al.* (2021) e Muthukrishnan *et al.* (2022), os quais mostraram que o avanço da hidratação do cimento contribui para o refinamento da estrutura porosa do concreto. Além disso, os produtos de hidratação ajudam a preencher parte dos poros presentes no biochar, reduzindo a permeabilidade do material.

De forma geral, os resultados desta pesquisa mostram que a incorporação de BCA pode aumentar a absorção de água nas primeiras idades de cura. Entretanto, com o avanço da cura, ocorre melhora da microestrutura do concreto, reduzindo gradualmente a permeabilidade e aproximando o comportamento dos concretos com biochar ao concreto de referência sem BCA.

CONCLUSÃO

A presente pesquisa investigou o impacto da incorporação do biochar de casca de arroz (BCA) como substituto parcial do cimento Portland nas propriedades mecânicas e de transporte de fluidos de matrizes cimentícias, avaliando comparativamente o comportamento de concretos e argamassas. Com base nos dados experimentais obtidos ao longo de 56 dias de monitoramento, as seguintes conclusões foram extraídas:

Dinâmica Capilar nas Idades Iniciais (7 dias): A incorporação de teores intermediários e elevados de biochar (5% e 10% de BCA) promoveu aumento na absorção capilar e na velocidade de transporte de água nas idades precoces, comportamento verificado tanto nos concretos quanto nas argamassas. Esse fenômeno é atribuído à porosidade intrínseca e à hidrofilia da biomassa pirolisada que, inserida em matrizes ainda jovens e com reações de hidratação incompletas, atua como uma rede de canais preferenciais para a percolação inicial de fluidos.

Inocuidade do Teor de 1%: O traço contendo 1% de BCA demonstrou um perfil de absorção capilar e de resistência mecânica virtualmente idêntico ao das misturas de referência (0% BCA) em todas as idades testadas, mantendo a consistência tanto para o concreto quanto para a argamassa. Este resultado indica que substituições parciais discretas são tecnicamente viáveis desde o início da cura, sem acarretar prejuízos à permeabilidade e à integridade das matrizes.

Desempenho Mecânico à Compressão: Os ensaios de resistência à compressão axial revelaram que o teor de 5% de BCA apresentou o melhor equilíbrio mecânico entre as misturas modificadas. Embora teores mais elevados (10%) possam gerar reduções discretas na resistência inicial pelo aumento da porosidade total, o traço de 5% consolidou-se em um grupo estatisticamente distinto e favorável, alcançando patamares de resistência compatíveis e, em certos casos, superiores aos do traço de referência a idades avançadas.

Comprovação da Atividade Pozolânica e Efeito Filler (56 dias): O resultado mais expressivo do estudo consiste na convergência das curvas de absorção e no incremento de resistência observados aos 56 dias de cura para ambos os materiais (concretos e argamassas). Esse comportamento comprova a ocorrência da atividade pozolânica da sílica amorfa presente no BCA, associada ao efeito *filler*. A reação dos componentes do biochar com o hidróxido de cálcio Ca (OH)_2 gerou silicatos de cálcio hidratados (C-S-H) adicionais, os quais preencheram os vazios internos da biomassa, refinaram a estrutura porosa e segmentaram a conectividade dos poros capilares.

Especificidades entre as Matrizes: Constatou-se que as argamassas, devido ao maior volume de pasta e ausência de agregado graúdo, apresentaram uma cinética de absorção inicial ligeiramente mais homogênea e distribuição de tensões de compressão mais uniforme em comparação aos concretos. No entanto, o fenômeno de refinamento poroso tardio manifestou-se de forma eficaz e análoga em ambos os materiais.

Em suma, os resultados obtidos validam a viabilidade técnica da utilização do biochar de casca de arroz como substituto parcial do cimento Portland em concretos e argamassas. Embora a presença da biomassa requeira atenção quanto à permeabilidade nas idades iniciais, o amadurecimento natural e a atividade pozolânica do material aos 56 dias atenuam esses impactos, resultando em matrizes duráveis, resistentes e estanques. Consolida-se, assim, uma alternativa ecoeficiente promissora para a redução da pegada de carbono na construção civil, por meio da valorização tecnológica de um subproduto da agroindústria regional.

4.6 Agradecimentos

Este trabalho foi realizado com o apoio da Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Goiás **(FAPEG, CHAMADA 06/2024 - BOLSAS DE FORMAÇÃO DE MESTRADO E DOUTORADO 2024. Nº Proc. SEI 202410267000731)**, a quem agradecemos o suporte e financiamento que possibilitaram o desenvolvimento desta pesquisa.

Ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Aplicada e Sustentabilidade do IF Goiano.

5. REFERÊNCIAS

- ABNT – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 16697: CIMENTO PORTLAND — REQUISITOS [PORTLAND CEMENT — REQUIREMENTS]. RIO DE JANEIRO, 2018. (IN PORTUGUESE).
- ABNT – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 5752: MATERIAIS POZOLÂNICOS — DETERMINAÇÃO DO ÍNDICE DE DESEMPENHO COM CIMENTO PORTLAND AOS 28 DIAS [POZZOLANIC MATERIALS — DETERMINATION OF THE PERFORMANCE INDEX WITH PORTLAND CEMENT AT 28 DAYS]. RIO DE JANEIRO, 2014. (IN PORTUGUESE).
- AHMAD, SAJJAD ET AL. HIGH PERFORMANCE SELF-CONSOLIDATING CEMENTITIOUS COMPOSITES BY USING MICRO CARBONIZED BAMBOO PARTICLES. *MATERIALS & DESIGN*, v. 76, p. 223-229, 2015. [HTTPS://DOI.ORG/10.1016/J.MATDES.2015.03.048](https://doi.org/10.1016/j.matdes.2015.03.048)
- AKHTAR, ALI; SARMAH, AJIT K. STRENGTH IMPROVEMENT OF RECYCLED AGGREGATE CONCRETE THROUGH SILICON RICH CHAR DERIVED FROM ORGANIC WASTE. *JOURNAL OF CLEANER PRODUCTION*, v. 196, p. 411-423, 2018. [HTTPS://DOI.ORG/10.1016/J.JCLEPRO.2018.06.044](https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.06.044)
- AKINYEMI, BANJO A.; ADESINA, ADEYEMI. RECENT ADVANCEMENTS IN THE USE OF BIOCHAR FOR CEMENTITIOUS APPLICATIONS: A REVIEW. *JOURNAL OF BUILDING ENGINEERING*, v. 32, p. 101705, 2020. [HTTPS://DOI.ORG/10.1016/J.JOBE.2020.101705](https://doi.org/10.1016/j.job.2020.101705)
- BENTCHIKOU, MOHAMED ET AL. EFFECT OF RECYCLED CELLULOSE FIBRES ON THE PROPERTIES OF LIGHTWEIGHT CEMENT COMPOSITE MATRIX. *CONSTRUCTION AND BUILDING MATERIALS*, v. 34, p. 451-456, 2012. [HTTPS://DOI.ORG/10.1016/J.CONBUILDMAT.2012.02.097](https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2012.02.097)
- DO NASCIMENTO, EMILLI RODRIGUES; DE MORAIS, DENILSON PEDRO FERREIRA; LOPES, SHARA CARVALHO. SUSTAINABILITY IN CIVIL CONSTRUCTION IN BRAZIL: A REVIEW OF THE LITERATURE. *RESEARCH, SOCIETY AND DEVELOPMENT*, v. 11, n. 14, p. e524111436611-e524111436611, 2022. [HTTPS://DOI.ORG/10.33448/RSD-V11I14.36611](https://doi.org/10.33448/rsd-v11i14.36611)
- ENVIRONMENT, U. N. ET AL. ECO-EFFICIENT CEMENTS: POTENTIAL ECONOMICALLY VIABLE SOLUTIONS FOR A LOW-CO₂ CEMENT-BASED MATERIALS INDUSTRY. *CEMENT AND CONCRETE RESEARCH*, v. 114, p. 2-26, 2018. [HTTPS://DOI.ORG/10.1016/J.CEMCONRES.2018.03.015](https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2018.03.015)
- GUPTA, SOURADEEP; KUA, HARN WEI. EFFECT OF WATER ENTRAINMENT BY PRE-SOAKED BIOCHAR PARTICLES ON STRENGTH AND PERMEABILITY OF CEMENT MORTAR. *CONSTRUCTION AND BUILDING MATERIALS*, v. 159, p. 107-125, 2018. [HTTPS://DOI.ORG/10.1016/J.CONBUILDMAT.2017.10.095](https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.10.095)
- HE, MINGJING ET AL. WASTE-DERIVED BIOCHAR FOR WATER POLLUTION CONTROL AND SUSTAINABLE DEVELOPMENT. *NATURE REVIEWS EARTH & ENVIRONMENT*, v. 3, n. 7, p. 444-460, 2022.
- HOSSAIN, MD UZZAL ET AL. TECHNO-ENVIRONMENTAL FEASIBILITY OF WOOD WASTE DERIVED FUEL FOR CEMENT PRODUCTION. *JOURNAL OF CLEANER PRODUCTION*, v. 230, p. 663-671, 2019. [HTTPS://DOI.ORG/10.1016/J.JCLEPRO.2019.05.132](https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.05.132)
- HYLTON, JULIA ET AL. RELEVANT BIOCHAR CHARACTERISTICS INFLUENCING COMPRESSIVE STRENGTH OF BIOCHAR-CEMENT MORTARS. *BIOCHAR*, v. 6, n. 1, p. 1-27, 2024. [HTTPS://DOI.ORG/10.1007/S42773-024-00375-6](https://doi.org/10.1007/s42773-024-00375-6)

IBGE, 2024: INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATISTICA. LEVANTAMENTO SISTEMÁTICO DA PRODUÇÃO AGRÍCOLA. RIO DE JANEIRO, RJ. [HTTPS://WWW.IBGE.GOV.BR/ESTATISTICAS/ECONOMICAS/AGRICULTURA-E-PECUARIA/9201-LEVANTAMENTO-SISTEMATICO-DA-PRODUCAO-AGRICOLA.HTML](https://www.ibge.gov.br/estatisticas/economicas/agricultura-e-pecuaria/9201-levantamento-sistematico-da-producao-agricola.html).

LEHNE, JOHANNA; PRESTON, FELIX. MAKING CONCRETE CHANGE: INNOVATION IN LOW-CARBON CEMENT AND CONCRETE. CHATHAM HOUSE REPORT, v. 13, 2018. [HTTPS://WWW.CHATHAMHOUSE.ORG/SITES/DEFAULT/FILES/PUBLICATIONS/RESEARCH/2018-06-13-MAKING-CONCRETE-CHANGE-CEMENT-LEHNE-PRESTON.PDF?UTM_SOURCE=CHATGPT.COM](https://www.chathamhouse.org/sites/default/files/publications/research/2018-06-13-making-concrete-change-cement-lehne-preston.pdf?utm_source=chatgpt.com)

LENG, LIJIAN; HUANG, HUAJUN. AN OVERVIEW OF THE EFFECT OF PYROLYSIS PROCESS PARAMETERS ON BIOCHAR STABILITY. BIORESOURCE TECHNOLOGY, v. 270, p. 627-642, 2018. [HTTPS://DOI.ORG/10.1016/J.BIORTECH.2018.09.030](https://doi.org/10.1016/j.biortech.2018.09.030)

LOPES, HERBERT MEDEIROS TORRES; PEÇANHA, ANA CAROLINA CORSI; CASTRO, ALESSANDRA LORENZETTI DE. CONSIDERAÇÕES SOBRE A EFICIÊNCIA DE MISTURAS DE CONCRETO DE CIMENTO PORTLAND COM BASE NO CONCEITO DE EMPACOTAMENTO DE PARTÍCULAS. MATÉRIA (RIO DE JANEIRO), v. 25, n. 1, p. E-12549, 2020. [HTTP://DX.DOI.ORG/10.1590/S1517-707620200001.0874](http://dx.doi.org/10.1590/s1517-707620200001.0874).

LOPES, MARCOS ANTONIO PEREIRA; JUNIOR, ALEX NEVES; BIANCHINI, GLAUCO FABRÍCIO. USO DO BIOCARVÃO DA CASCA DE ARROZ EM PASTAS DE BAIXA RELAÇÃO ÁGUA X CIMENTO PARA CAPTURA DE CO₂. ENCONTRO LATINO-AMERICANO E EUROPEU SOBRE EDIFICAÇÕES E COMUNIDADES SUSTENTÁVEIS, 2023.

MALJAE, HAMID ET AL. EFFECT OF CEMENT PARTIAL SUBSTITUTION BY WASTE-BASED BIOCHAR IN MORTARS PROPERTIES. CONSTRUCTION AND BUILDING MATERIALS, v. 301, p. 124074, 2021. [HTTPS://DOI.ORG/10.1016/J.CONBUILDMAT.2021.124074](https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.124074)

MALJAE, HAMID ET AL. INCORPORATION OF BIOCHAR IN CEMENTITIOUS MATERIALS: A ROADMAP OF BIOCHAR SELECTION. CONSTRUCTION AND BUILDING MATERIALS, v. 283, p. 122757, 2021. [HTTPS://DOI.ORG/10.1016/J.CONBUILDMAT.2021.122757](https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.122757)

MUTHUKRISHNAN, SHRAVAN; GUPTA, SOURADEEP; KUA, HARN WEI. APPLICATION OF RICE HUSK BIOCHAR AND THERMALLY TREATED LOW SILICA RICE HUSK ASH TO IMPROVE PHYSICAL PROPERTIES OF CEMENT MORTAR. THEORETICAL AND APPLIED FRACTURE MECHANICS, v. 104, p. 102376, 2019. [HTTPS://DOI.ORG/10.1016/J.TAFMEC.2019.102376](https://doi.org/10.1016/j.tafmec.2019.102376)

MUTHUKRISHNAN, SHRAVAN; GUPTA, SOURADEEP; KUA, HARN WEI. APPLICATION OF RICE HUSK BIOCHAR AND THERMALLY TREATED LOW SILICA RICE HUSK ASH TO IMPROVE PHYSICAL PROPERTIES OF CEMENT MORTAR. THEORETICAL AND APPLIED FRACTURE MECHANICS, v. 104, p. 102376, 2019. [HTTPS://DOI.ORG/10.1016/J.TAFMEC.2019.102376](https://doi.org/10.1016/j.tafmec.2019.102376)

NBR 16605: CIMENTO PORTLAND E OUTROS MATERIAIS EM PÓ - DETERMINAÇÃO DA MASSA ESPECÍFICA. RIO DE JANEIRO, ABNT, 2017.

NBR 16889: CONCRETO - DETERMINAÇÃO DA CONSISTÊNCIA PELO ABATIMENTO DO TRONCO DE CONE. RIO DE JANEIRO, ABNT, 2020.

NBR 16972: AGREGADOS - DETERMINAÇÃO DA MASSA UNITÁRIA E DO ÍNDICE DE VAZIOS. RIO DE JANEIRO, ABNT, 2021.

NBR 17054: AGREGADOS - DETERMINAÇÃO DA COMPOSIÇÃO GRANULOMÉTRICA - MÉTODO DE ENSAIO. RIO DE JANEIRO, ABNT, 2022.

NBR 5739: CONCRETO - ENSAIO DE COMPRESSÃO DE CORPOS-DE-PROVA CILÍNDRICOS. RIO DE JANEIRO, ABNT, 2018.

NBR 5751: MATERIAIS POZOLÂNICO - DETERMINAÇÃO DA ATIVIDADE POZOLÂNICA COM CALAOS SETE DIAS. RIO DE JANEIRO, ABNT, 2015.

NBR 5752: MATERIAIS POZOLÂNICO - DETERMINAÇÃO DO ÍNDICE DE DESEMPENHO COM CIMENTO PORTLAND AOS 28 DIAS. RIO DE JANEIRO, ABNT, 2014.

NBR 6118: PROJETO DE ESTRUTURAS DE CONCRETO. RIO DE JANEIRO, ABNT, 2023.

NBR 7214: AREIA NORMAL PARA ENSAIO DE CIMENTO - ESPECIFICAÇÃO. RIO DE JANEIRO, ABNT, 2015.

NBR 7215: CIMENTO PORTLAND - DETERMINAÇÃO DA RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO DE CORPOS DE PROVA CILÍNDRICOS. RIO DE JANEIRO, ABNT, 2019.

NBR 9778: ARGAMASSA E CONCRETO ENDURECIDOS - DETERMINAÇÃO DA ABSORÇÃO DE ÁGUA, ÍNDICE DE VAZIOS E MASSA ESPECÍFICA. RIO DE JANEIRO, ABNT, 2005.

NBR 9779: ARGAMASSA E CONCRETO ENDURECIDOS - DETERMINAÇÃO DA ABSORÇÃO DE ÁGUA POR CAPILARIDADE. RIO DE JANEIRO, ABNT, 2012.

NBR NM 52: AGREGADO MIÚDO - DETERMINAÇÃO DA MASSA ESPECÍFICA E MASSA ESPECÍFICA APARENTE. RIO DE JANEIRO, ABNT, 2003.

NEVES JUNIOR, A. TOLEDO FILHO, R.D. FAIRBAIRN, E.M.R, DWECK, J. A STUDY OF THE CARBONATIONS PROFILE OF CEMENT PASTES BY THERMOGRAVIMETRY AND ITS EFFECT ON THE COMPRESSIVE STRENGTH. JOURNAL THERM ANAL CALORIM. 2013.

NEVES JUNIOR, ALEX ET AL. EARLY CARBONATION CURING EFFECTS ON THE MICROSTRUCTURE OF HIGH INITIAL STRENGTH PORTLAND CEMENT PASTES. ADVANCES IN CEMENT RESEARCH, v. 31, n. 8, p. 382-388, 2019. [HTTPS://DOI.ORG/10.1680/JADCR.18.00017](https://doi.org/10.1680/JADCR.18.00017)

QIN, YINGHONG ET AL. EVALUATION OF PERVIOUS CONCRETE PERFORMANCE WITH PULVERIZED BIOCHAR AS CEMENT REPLACEMENT. CEMENT AND CONCRETE COMPOSITES, v. 119, p. 104022, 2021. [HTTP://WWW.ELSEVIER.COM/LOCATE/CEMCONCOMP](http://www.elsevier.com/locate/cemconcomp)

QING, LONGBANG; ZHANG, HAO; ZHANG, ZHIKUN. EFFECT OF BIOCHAR ON COMPRESSIVE STRENGTH AND FRACTURE PERFORMANCE OF CONCRETE. JOURNAL OF BUILDING ENGINEERING, v. 78, p. 107587, 2023. [HTTPS://DOI.ORG/10.1016/J.JOBE.2023.107587](https://doi.org/10.1016/J.JOBE.2023.107587)

RAJAPAKSHA, ANUSHKA UPAMALI ET AL. ENGINEERED/DESIGNER BIOCHAR FOR CONTAMINANT REMOVAL/IMMOBILIZATION FROM SOIL AND WATER: POTENTIAL AND IMPLICATION OF BIOCHAR MODIFICATION. CHEMOSPHERE, v. 148, p. 276-291, 2016.

RUPASINGHE, MADHUWANTHI ET AL. CARBON SEQUESTERING BIOCHAR INCORPORATED CEMENTITIOUS COMPOSITES: EVALUATION OF HYGROTHERMAL, MECHANICAL AND DURABILITY

CHARACTERISTICS. CEMENT AND CONCRETE COMPOSITES, v. 157, p. 105864, 2025. [HTTPS://DOI.ORG/10.1016/J.CEMCONCOMP.2024.105864](https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2024.105864)

SCRIVENER, K. L., JOHN, V. M., & ELLIS, E. F. (2018). ECO-EFFICIENT CEMENTS: POTENTIAL ECONOMICALLY VIABLE SOLUTIONS FOR A LOW-CO₂ CEMENT-BASED ECONOMY. CEMENT AND CONCRETE RESEARCH, 114, 2-26. [HTTPS://DOI.ORG/10.1016/J.CEMCONRES.2018.03.015](https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2018.03.015)

SINGH, SHWETA ET AL. ENHANCING THE STRENGTH AND DURABILITY OF MIXED BIOCHAR-BLENDED MORTARS AFTER ACCELERATED CARBONATION CURING (ACC). JOURNAL OF BUILDING ENGINEERING, v. 100, p. 111743, 2025. [HTTPS://DOI.ORG/10.1016/J.JOBE.2024.111743](https://doi.org/10.1016/j.jobe.2024.111743)

TAN, KANG-HAO ET AL. BIOCHAR AS A PARTIAL CEMENT REPLACEMENT MATERIAL FOR DEVELOPING SUSTAINABLE CONCRETE: AN OVERVIEW. JOURNAL OF MATERIALS IN CIVIL ENGINEERING, v. 33, n. 12, p. 03121001, 2021.

TAN, KANGHAO; QIN, YINGHONG; WANG, JUNSONG. EVALUATION OF THE PROPERTIES AND CARBON SEQUESTRATION POTENTIAL OF BIOCHAR-MODIFIED PERVIOUS CONCRETE. CONSTRUCTION AND BUILDING MATERIALS, v. 314, p. 125648, 2022. [HTTPS://DOI.ORG/10.1016/J.CONBUILDMAT.2021.125648](https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.125648)

TRIPATHI, NIMISHA ET AL. BIOMASS WASTE UTILISATION IN LOW-CARBON PRODUCTS: HARNESSING A MAJOR POTENTIAL RESOURCE. NPJ CLIMATE AND ATMOSPHERIC SCIENCE, v. 2, n. 1, p. 35, 2019. [HTTPS://DOI.ORG/10.1016/J.CHEMOSPHERE.2016.01.043](https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2016.01.043)

WANG, HAODONG ET AL. DURABILITY OF SFCB REINFORCED LOW-ALKALINITY SEAWATER SEA SAND CONCRETE BEAMS IN MARINE ENVIRONMENT. ENGINEERING STRUCTURES, v. 317, p. 118616, 2024. [HTTPS://DOI.ORG/10.1016/J.ENGSTRUCT.2024.118616](https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2024.118616)

WANG, LEI ET AL. BIOCHAR AS GREEN ADDITIVES IN CEMENT-BASED COMPOSITES WITH CARBON DIOXIDE CURING. JOURNAL OF CLEANER PRODUCTION, v. 258, p. 120678, 2020.

ZOU, SHUAI ET AL. CARBON SEQUESTRATION IN AGGREGATE AND CONCRETE BY ENCAPSULATED BIOCHAR AND CARBONATION: EXPERIMENT AND SIMULATION. CEMENT AND CONCRETE COMPOSITES, v. 159, p. 105990, 2025. [HTTPS://DOI.ORG/10.1016/J.CEMCONCOMP.2025.105990](https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2025.105990).

6. APÊNDICE

GRAPHICAL ABSTRACT

