

UNIVERSIDADE FEDERAL DE VIÇOSA

Utilização do biochar de eucalipto em matriz cimentícia

Jane Aparecida dos Santos
Magister Scientiae

**VIÇOSA - MINAS GERAIS
2025**

JANE APARECIDA DOS SANTOS

Utilização do biochar de eucalipto em matriz cimentícia

Dissertação apresentada à Universidade Federal de Viçosa, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, para obtenção do título de *Magister Scientiae*.

Orientador: Leonardo Goncalves Pedroti

**VIÇOSA - MINAS GERAIS
2025**

**Ficha catalográfica elaborada pela Biblioteca Central da Universidade
Federal de Viçosa - Campus Viçosa**

T

S237u Santos, Jane Aparecida dos, 1997-
2025 Utilização do biochar de eucalipto em matriz cimentícia /
Jane Aparecida dos Santos. – Viçosa, MG, 2025.
1 dissertação eletrônica (80 f.): il. (algumas color.).

Orientador: Leonardo Gonçalves Pedroti.
Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Viçosa,
Departamento de Engenharia Civil, 2025.

Inclui bibliografia.

DOI: <https://doi.org/10.47328/ufvbbt.2025.548>

Modo de acesso: World Wide Web.

1. Compósitos de cimento. 2. Biochar. 3. Biomassa vegetal.
4. Eucalipto - Eliminação de resíduos. 5. Resíduos vegetais -
Reaproveitamento. I. Pedroti, Leonardo Gonçalves, 1978-
II. Universidade Federal de Viçosa. Departamento de Engenharia
Civil. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil.
III. Título.

CDD 22. ed. 693.993

JANE APARECIDA DOS SANTOS

Utilização do biochar de eucalipto em matriz cimentícia

Dissertação apresentada à Universidade Federal de Viçosa, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, para obtenção do título de *Magister Scientiae*.

APROVADA: 27 de fevereiro de 2025.

Assentimento:

Jane Aparecida dos Santos
Autora

Leonardo Goncalves Pedroti
Orientador

Essa dissertação foi assinada digitalmente pela autora em 27/08/2025 às 22:15:59 e pelo orientador em 28/08/2025 às 12:09:02. As assinaturas têm validade legal, conforme o disposto na Medida Provisória 2.200-2/2001 e na Resolução nº 37/2012 do CONARQ. Para conferir a autenticidade, acesse <https://siadoc.ufv.br/validar-documento>. No campo 'Código de registro', informe o código **3ZUZ.IZ57.LM5H** e clique no botão 'Validar documento'.

*A Deus, aos meus pais
Fábio (in memoriam) e Valéria, e ao
meu esposo Edney.*

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus, sem Ele nada seria possível. Sou grata pelo dom da vida, pela saúde e por suas misericórdias que não possuem fim.

Ao meu esposo, por todo carinho, dedicação e apoio. Amo você infinitamente.

Aos meus pais Valéria e Fábio (in memorian) e aos meus irmãos Dário e Daniel, amo vocês.

À Universidade Federal de Viçosa (UFV) e ao Departamento de Engenharia Civil (DEC) que possibilitaram o desenvolvimento desta pesquisa.

Ao professor Dr. Leonardo Gonçalves Pedroti, meu orientador, pelas valiosas contribuições, amizade e confiança.

À professora Dr. Angélica de Cássia Oliveira Carneiro, pelo apoio e valiosas orientações em todo o processo de produção do biochar.

À professora Dr. Beatryz, pela colaboração em diversas etapas da minha vida acadêmica e pela amizade.

Aos demais professores do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil pelos ensinamentos e pela excelente convivência.

Este trabalho foi realizado com o apoio das seguintes agências de pesquisa brasileiras: Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – Brasil (CAPES) – Código de Financiamento 001, Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Minas Gerais (FAPEMIG) e Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq).

A doutoranda Hellen que com sua amizade tornou meus dias mais leves, além de colaborar com sugestões preciosas.

Aos estagiários Giovana e Bernardo pela dedicação, parceria e amizade.

Aos colegas de pós-graduação pelo companheirismo, auxílio e amizade.

Agradeço aos técnicos de Laboratório de Materiais de Construção e de geotecnia em especial a Nathália, José Carlos, Wellington, José Dias e Giovane, pelo apoio e amizade.

Agradeço aos técnicos de Laboratório de Painéis e Madeira do Departamento de Engenharia Florestal em especial ao Bráulio, Fernanda e Edna, por todo carinho, dedicação e apoio sanando as diversas dúvidas.

Ao Núcleo de Microscopia e Microanálise (UFV), ao Laboratório de Mineralogia dos Solos e Geoquímica (DPS/UFV), ao Laboratório de Difração e Espalhamento de Raios-X (DPF/UFV) e ao Laboratório de Nanoscopia (DPF/UFV).

Todos vocês foram fundamentais, direta ou indiretamente, na elaboração desta dissertação e também para meu crescimento pessoal e profissional.

“Filho meu, não te esqueças da minha lei, e o teu coração guarde meus mandamentos”.
(Provérbios 3:1)

RESUMO

SANTOS, Jane Aparecida dos, M.Sc., Universidade Federal de Viçosa, fevereiro de 2025. **Utilização do biochar de eucalipto em matriz cimentícia.** Orientador: Leonardo Goncalves Pedroti.

Em 2022, as emissões de CO₂ provenientes de edificações representaram 34% da demanda global de energia e 37% das emissões de CO₂ relacionadas à energia e processos. Nesse contexto, a construção civil global necessita reduzir suas emissões pela metade até 2030, a fim de alcançar a meta de emissões líquidas zero de CO₂ até 2050. Paralelamente, o Brasil gera anualmente cerca de 1,5 milhão de toneladas de resíduos provenientes do eucalipto e de outras madeiras, oriundas majoritariamente da construção civil. Dessa forma, destaca-se a necessidade de investimentos em tecnologias que mitiguem a poluição ambiental, por meio da reciclagem de resíduos ou mesmo geração de crédito de carbono. O biochar surge como uma solução promissora, por ser um material rico em carbono e, quando incorporado a compósitos cimentícios, pode reduzir o impacto ambiental, além de melhorar propriedades mecânicas e físicas da matriz cimentícia. A presente dissertação foi dividida em duas etapas. Na primeira, realizou-se a avaliação das propriedades físico-mecânicas de argamassas com biochar proveniente da biomassa de eucalipto, produzido em diferentes temperaturas (450, 650 e 750 °C) como substituinte parcial da areia, em proporções de 10% e 20%. No estado fresco, foram analisados o teor de ar incorporado, o índice de consistência e a retenção de água; enquanto no estado endurecido, avaliou-se a resistência à compressão e à tração, a retração e a evolução do endurecimento do compósito por meio do ensaio de variação da velocidade de propagação de ultrassom (VPU). Os resultados indicaram que a resistência à compressão foi diretamente influenciada pela temperatura de pirólise do biochar, sendo que o material produzido a 750 °C apresentou propriedades pozolânicas conforme o ensaio de Chapelle. Na segunda etapa, buscou-se avaliar a resistência mecânica e a ecoeficiência da substituição parcial do cimento por biochar, nas proporções de 5%, 10% e 15%. Verificou-se que, embora o aumento do teor de biochar tenha causado redução na resistência mecânica das argamassas, houve, em contrapartida, uma considerável diminuição nas emissões de CO₂, evidenciando o potencial do biochar como um material sustentável para a construção civil.

Palavras-chave: compósitos de cimento; biochar; biomassa vegetal; eucalipto; resíduos vegetais

ABSTRACT

SANTOS, Jane Aparecida dos, M.Sc., Universidade Federal de Viçosa, February, 2025. **Use of eucalyptus biochar in cement matrix**. Adviser: Leonardo Goncalves Pedroti.

In 2022, CO₂ emissions from buildings accounted for 34% of global energy demand and 37% of energy and process-related CO₂ emissions. In this context, the global construction industry needs to halve its emissions by 2030 in order to achieve the goal of net-zero CO₂ emissions by 2050. At the same time, Brazil generates approximately 1.5 million tons of waste from eucalyptus and other woods annually, mostly from the construction industry. Therefore, there is a need for investments in technologies that mitigate environmental pollution, through waste recycling or even the generation of carbon credits. Biochar emerges as a promising solution, as it is a carbon-rich material and, when incorporated into cementitious composites, can reduce the environmental impact, in addition to improving the mechanical and physical properties of the cementitious matrix. This dissertation was divided into two stages. The first stage evaluated the physical and mechanical properties of mortars with biochar from eucalyptus biomass, produced at different temperatures (450, 650 and 750 °C) as a partial substitute for sand, in proportions of 10% and 20%. In the fresh state, the incorporated air content, consistency index and water retention were analyzed; while in the hardened state, the compressive and tensile strength, shrinkage and hardening evolution of the composite were evaluated by means of the ultrasound propagation velocity variation (UPV) test. The results indicated that the compressive strength was directly influenced by the pyrolysis temperature of the biochar, and the material produced at 750 °C presented pozzolanic properties according to the Chapelle test. In the second stage, we sought to evaluate the mechanical strength and eco-efficiency of the partial replacement of cement by biochar, in proportions of 5%, 10% and 15%. It was found that, although the increase in biochar content caused a reduction in the mechanical strength of the mortars, there was, on the other hand, a considerable decrease in CO₂ emissions, highlighting the potential of biochar as a sustainable material for civil construction.

Keywords: cement composites; biochar; vegetable biomass; eucalyptus; vegetable waste

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1- Caracterização da areia	34
Figura 2 – Processo de produção BC	36
Figura 3 – Moagem do 10BC	37
Figura 4 – Moagem do 20BC	37
Figura 5 – (a, b) Mesa de ensaio para determinação do índice de consistência da argamassa. (c) Equipamentos utilizado para a determinação da massa específica. (d) Equipamentos utilizados para a determinação da retenção de água.	40
Figura 6 – (a) Teste tração na flexão. (b) Teste à compressão.	41
Figura 7 – (a) Moldagem dos corpos de prova para determinação da aderência. (b) Pastilha metálica. (c) Equipamentos utilizado para a determinação da aderência.	42
Figura 8 – Avaliação da absorção por capilaridade.....	42
Figura 9 – Equipamento para determinação da VPU	43
Figura 10 – (a) Granulometria à laser para BC450. (b) Granulometria à laser para BC650. (c) Granulometria à laser para BC750.	46
Figura 11 – (a) Espectroscopia FTIR para NAT. (b) Espectroscopia FTIR para BC450. (c) Espectroscopia FTIR para BC650. (d) Espectroscopia FTIR para BC750.	47
Figura 12 – (a) Difratorômetro de Raios X da amostra NAT. (b) Difratorômetro de Raios X da amostra B450. (c) Difratorômetro de Raios X da amostra B650. (d) Difratorômetro de Raios X da amostra B750.....	49
Figura 13 – (a) MEV amostra BC450. (b) MEV amostra BC650. (c) MEV amostra BC750.	50
Figura 14 – Resistência à compressão	52
Figura 15 – Resistência à tração na flexão	53
Figura 16 – Resistência de aderência à tração	54
Figura 17 – Resistência de aderência à tração (a) Amostra 10BC450. (b) Amostra 10BC650. (c) Amostra 10BC750. (d) Amostra 20BC450. (e) Amostra 20BC650. (f) Amostra 20BC750. (g) Amostra REF.	55
Figura 18 – Crescimento da absorção por capilaridade para 10 e 90 minutos	57
Figura 19 – Variação da VPU média no estado fresco.....	58
Figura 20 – (a) MEV X1000 no CP 10B450. (b) MEV 1000x no CP 10B650. (c) MEV 1000x no CP 10B750. (d) MEV 1000x no CP 20B450. (e) MEV 1000x no CP 20B650. (f) MEV 1000x no CP 20B750. (g) MEV 1000x no CP REF.....	59

Figura 21 – (a) MEV 3000x no CP 10B450. (b) MEV 3000x no CP 10B650. (c) MEV 3000x no CP 10B750. (d) MEV 3000x no CP 20B450. (e) MEV 3000x no CP 20B650. (f) MEV 3000x no CP 20B750. (g) MEV 3000x no CP REF.....	60
Figura 23 – (a) Amostra de BC após passar pela moagem. (b) Equipamento moinho de autoeficiência.....	63
Figura 24 – Preparação e desempenho mecânico das amostras: (a) Cura úmida em câmara com temperatura controlada. (b) compressão simples. (c) prensa hidráulica/elétrica utilizada no ensaio de resistência à compressão.....	66
Figura 25 – (a) Espectroscopia FTIR para NAT. (b) Espectroscopia FTIR para BC750.	68
Figura 26 – (a) Difratorômetro de Raios X da amostra NAT. (b) Difratorômetro de Raios X da amostra B750.....	69
Figura 27 – Resistência à compressão.....	71
Figura 28 – Correlação entre resistência e emissão de CO ₂ eq	73
Figura 29 – Correlação estatística entre emissão e resistência mecânica.....	73
Figura 30 – Regressão para emissão e resistência mecânica.....	74

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Caracterização do cimento segundo a NBR 16605:2017	34
Tabela 2 – Tempo de moagem do BC	36
Tabela 3 – Análise Química Imediata do BC e NAT	38
Tabela 4 - Traço em massa das misturas	39
Tabela 5 – BET das amostras	44
Tabela 6 – Massa específica do BC	46
Tabela 7 – Ensaio de Chapelle para verificação da pozolanicidade	48
Tabela 8 – FRX das amostras	50
Tabela 9 – Propriedades físicas das argamassas com incorporação de BC e REF	51
Tabela 10 – Absorção por capilaridade	56
Tabela 11 – Kg de CO ₂ eq para produção de 1 kg de cimento CPV	65
Tabela 12 – Composição da argamassa em massa (kg)	66
Tabela 13 – BET das amostras	67
Tabela 14 – FRX das amostras	69
Tabela 15 – Emissão das amostras	72

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	13
1.1 Considerações iniciais	13
1.2 Objetivo	14
1.2.1 Objetivo Geral.....	14
1.2.2 Objetivos específicos	14
1.3 Justificativa.....	15
1.4 Estrutura da dissertação	16
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	17
2.1 Materiais com efeito filler e pozolanicidade	17
2.2 Biochar	18
2.3 Uso do biochar em matriz cimentícia	20
2.4 Influência do biochar nas propriedades frescas de compósitos cimentícios	21
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	23
3 INVESTIGAÇÃO DO DESEMPENHO FÍSICO-MECÂNICO EM ARGAMASSA DE REVESTIMENTO COM SUBSTITUIÇÃO DA AREIA POR BIOCHAR	32
3.1 INTRODUÇÃO.....	32
3.2 MATERIAIS E MÉTODOS.....	34
3.2.1 Cimento e agregados finos utilizados	34
3.2.2 Processo de produção do Biochar (BC)	35
3.2.3 Processo de moagem do Biochar (BC)	36
3.2.4 Análise Química Imediata do Biochar (BC).....	37
3.2.5 Área superficial, porosidade, granulometria à laser, massa específica e espectroscopia no infravermelho por transformada de Fourier (FTIR)	38
3.2.6 Análise de pozolanicidade do BC – Método Chapelle	38
3.2.7 Análise de Microscopia do BC e dos corpos de prova (CP's).....	39
3.2.8 Projeto de argamassa e proporção da mistura.....	39
3.2.9 Avaliação da argamassa em seu estado fresco.....	40
3.2.10 Avaliação da argamassa em seu estado endurecido.....	40
3.2.11 Avaliação da resistência de aderência à tração	41
3.2.12 Avaliação de absorção por capilaridade	42
3.2.13 Avaliação do tempo de cura através do pulso ultrassônico	43
3.3 RESULTADOS E DISCUSSÃO	44
3.3.1 Área superficial (BET) do BC	44
3.3.2 Granulometria à laser do BC após moagem	45
3.3.3 Determinação da massa específica do BC	46

3.3.4	Espectroscopia no infravermelho por transformada de Fourier (FTIR) das amostras de BC e NT	46
3.3.5	Pozolanicidade do BC.....	48
3.3.6	Determinação química e mineralógica das amostras de BC e NAT.....	48
3.3.7	Determinação da morfologia do BC	50
3.3.8	Propriedades físicas no estado fresco da argamassa de BC.....	51
3.3.9	Efeitos na resistência à compressão	51
3.3.10	Efeitos na resistência à tração na flexão	53
3.3.11	Resistência de aderência à tração NBR 13528:2019	53
3.3.12	Absorção por capilaridade nos CP's	55
3.3.13	Determinação da curva de cura pelo método VPU	57
3.3.14	Determinação da Microscopia de Varredura dos CP's.....	58
4	ANÁLISE DA SUBSTITUIÇÃO DO CIMENTO POR BIOCHAR, COM ÊNFASE NO DESEMPENHO MECÂNICO E NA AVALIAÇÃO DA ECOEFICIÊNCIA.....	61
4.1	INTRODUÇÃO.....	61
4.2	MATERIAIS E MÉTODOS.....	63
4.2.1	Processo de moagem do material.....	63
4.2.1	Caracterização do material.....	64
4.2.2	Avaliação da ecoeficiência	65
4.2.3	Produção e desempenho mecânico das misturas	66
4.3	Resultados e discussões	67
4.3.1	Caracterização do material.....	67
4.3.2	Influência do teor de substituição do cimento por biochar na resistência	69
4.3.3	Influência da resistência nas emissões de CO ₂ eq	72
5	CONCLUSÕES	74
5.1	SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....	76
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	77

1. INTRODUÇÃO

1.1 Considerações iniciais

De acordo com a declaração recente da Organização das Nações Unidas (ONU), a população mundial atingiu 8 bilhões de habitantes e continuará crescendo atingindo cerca de 10,4 bilhões até 2080. Os principais fatores relacionados a esse crescimento é o aumento exponencial da produção de resíduos, bem como as emissões de dióxido de carbono (Nações Unidas, *[S.d.]*).

De acordo com a Aliança Global para Edifícios e Construção estima-se que a indústria da construção é responsável por aproximadamente dois quintos de toda as emissões relacionadas à energia (BANDEIRA; MELLO; MAÇADA, 2009). Além disso, o setor da construção civil corresponde a 40% das emissões globais de dióxido de carbono (CO₂) (BAO; LEE; LU, 2020).

A crescente urbanização bem como o crescimento das indústrias de construção civil, associado às mudanças climáticas geram uma preocupação e aumentam o apelo por desenvolvimentos sustentáveis. Dessa forma, devido as características, o biochar se torna um candidato interessante para proporcionar o sequestro de carbono em matrizes cimentícias, uma vez que possui alta eficiência em adsorção de CO₂ e alta afinidade por produtos químicos não polares devido à sua superfície porosa (MUÑOZ et al., 2018), proporcionando também o melhoramento mecânico quando incorporado em argamassas (DOWNIE ET AL., 2012; LI et al., 2023).

O biochar é definido como um material rico em carbono, proveniente da carbonização de biomassa (matéria orgânica derivada de plantas e animais), sob baixa atmosfera de oxigênio, segundo o processo denominado pirólise (TOMCZYK; SOKOŁOWSKA; BOGUTA, 2020). Esse procedimento é um processo termoquímico da biomassa, que se baseia na decomposição térmica da matéria orgânica aquecida na ausência de oxigênio atmosférico, para a produção de gás pirolítico (biogás), óleo (bio-óleo) e carvão (biochar). O aquecimento é controlado por faixas de temperatura e fornece a energia necessária para romper ligações nas estruturas das 24 macromoléculas presentes na biomassa (MOTA et al., 2015). O biochar pode ser produzido a partir de diversas biomassas, tais como cascas de café, eucalipto, o bagaço de cana-de-açúcar, o babaçu, soja, a grama, entre outros.

A diversidade de aplicações do biochar depende de suas propriedades físico-químicas, que são regidas principalmente pelas condições de pirólise (temperatura e taxa de aquecimento) e pela matéria-prima original (JINDO et al., 2014). Nos últimos anos o biochar tem sido utilizado em

uma grande variedade de aplicações como, por exemplo, na produção de energia, agricultura, sequestro de carbono, biorefinaria, entre outros. Além disso, o biochar fornece uma estratégia alternativa para o gerenciamento de resíduos orgânicos (PANWAR; PAWAR; SALVI, 2019).

Dessa forma, o biochar como aditivo não é apenas sustentável, mas também uma possível solução econômica para melhorar as propriedades das argamassas. Por fim, Sisman et al. (2024), concluíram que a incorporação de biochar em compósitos cimentícios aumenta a resistência e a ductilidade, ao mesmo tempo que contribui para o desenvolvimento sustentável devido à reciclagem de resíduos.

1.2 Objetivo

1.2.1 Objetivo Geral

O objetivo geral deste projeto foi avaliar as propriedades físico-mecânicas da substituição da areia por biochar em argamassa de revestimento. A segunda etapa do trabalho consistiu na substituição do cimento pelo biochar, com foco na avaliação das propriedades mecânicas e da ecoeficiência. Para ambas as etapas, buscou-se determinar um traço ótimo em função dos resultados de resistência mecânica e no teor de substituição.

1.2.2 Objetivos específicos

Para alcançar tais propósitos foram estabelecidos os seguintes objetivos específicos:

- a) Avaliar a influência da variação do teor de biochar nas propriedades das argamassas no estado fresco e endurecido, para substituição da areia, em comparação a uma argamassa inorgânica para revestimento interno.
- b) Avaliar a influência da variação do teor de biochar na resistência no estado endurecido, em substituição ao cimento, em relação a resistência do cimento sem substituição.
- c) Avaliar a ecoeficiência de todos os tratamentos da segunda etapa.

1.3 Justificativa

O biochar se caracteriza por ser um material rico em carbono, que permite o sequestro deste de forma eficaz, sendo largamente utilizado como um corretivo do solo, propiciando maior produtividade agrícola (AGEGNEHU; SRIVASTAVA; BIRD, 2017; ARIF et al., 2020; BARROW, 2012; LEHMANN; JOSEPH, 2015; QIAN et al., 2015). Entretanto, a aplicação do biochar na construção é uma técnica recente, apesar disso a incorporação do biochar se mostra com grande potencial principalmente ao âmbito sustentável (BOUMAAZA et al., 2023; MONA et al., 2021; SMITH, 2016), já que o biochar, a depender da biomassa e condições de preparo, possui capacidade de reduzir as emissões líquidas de gases do efeito estufa em cerca de 870 kg de CO₂ equivalente por tonelada de matéria-prima seca, sendo cerca de 62-66% a partir da captura e armazenamento de carbono pela biomassa do biochar (ROBERTS et al., 2010). Isso se dá devido sua alta capacidade de adsorção de CO₂, resultante da sua afinidade por compostos não polares somada a alta fração de poros superficiais, resultando como vantagem adicional para o sequestro de carbono em materiais cimentícios (WEI et al., 2012).

Quando se trata de desempenho de materiais à base de cimento, o biochar exerce impacto positivo, pois possui efeito de densificação e capacidade de retenção de água. Além disso, o tamanho do grão da partícula do biochar age como microagregado, devido ser fino, preenchendo os vazios da mistura. Paralelo a isso o biochar promove uma hidratação adicional, pois tem a capacidade de absorver a água da mistura e liberá-la em fases posteriores (LIU; LI; XU, 2022; RESTUCCIA et al., 2020; SIRICO et al., 2020).

De acordo com Pang et al. (2024), a incorporação do biochar à matriz cimentícia aumenta a retenção de água e a coesão, simultaneamente em que reduz a densidade e trabalhabilidade aditivos redutores de água podem desempenhar o papel de compensar a trabalhabilidade reduzida, permitindo que o concreto atenda aos padrões preestabelecidos. Dessa forma, o biochar desempenha o papel de melhorar a morfologia, reduzindo fissuras e lascas. Contudo, o biochar melhora a resistência ao fogo, além de oferecer benefícios ambientais, tal como sequestro de carbono.

1.4 Estrutura da dissertação

Essa dissertação foi dividida em quatro capítulos: (1) Introdução Geral; (2) Investigação do desempenho físico-mecânico em argamassa de revestimento com substituição da areia por biochar; (3) Análise da substituição do cimento por biochar, com ênfase no desempenho mecânico e na avaliação da ecoeficiência; (4) Conclusão Geral.

O primeiro capítulo consiste em uma introdução geral ao tema, contendo as considerações iniciais para contextualização do presente trabalho bem como os objetivos, a justificativa e a estruturação da dissertação.

No segundo capítulo foi apresentada a revisão bibliográfica, onde foi apresentado o embasamento teórico e técnico para o desenvolvimento desta pesquisa.

No capítulo 3, foi realizada a investigação físico-mecânica de uma argamassa de revestimento externo com substituição da areia por biochar. Já o capítulo 4 corresponde a uma investigação sobre o desempenho mecânico e realizada a análise da ecoeficiência na substituição do cimento por biochar, com base na resistência mecânica do cimento.

Por fim, o capítulo 5 corresponde as conclusões, apresentando as considerações finais e sugestões para trabalhos futuros.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Materiais com efeito filler e pozolanicidade

Os aditivos minerais possuem a capacidade de reagir com o hidróxido de cálcio $[\text{Ca}(\text{OH})_2]$, originado da hidratação do cimento, formando o gel de silicato de cálcio hidratado (C-S-H), responsável por aprimorar as propriedades mecânicas da matriz cimentícia (LIU, 2010). Quando possuem granulometria fina, esses aditivos são capazes de preencher poros maiores, contribuindo para a melhoria da microestrutura interna do material (Khan, 2010; Yang; Cho, 2003). Além disso, o gel C-S-H resultante da reação pozolânica pode obstruir de forma relevante os canais de migração de íons na matriz cimentícia, reduzindo sua permeabilidade (LIU, 2010).

Dessa forma, os aditivos minerais podem exercer dois tipos de efeitos quando incorporados a matriz cimentícia, o efeito pozolânico e o efeito filler. Ambos contribuem para a melhorias das propriedades da matriz cimentícia, especialmente a resistência à compressão e a durabilidade (NOAMAN; KARIM; ISLAM, 2019).

O efeito pozolânico está relacionado à formação de compostos com propriedades cimentantes, como o silicato de cálcio hidratado (CSH), resultante da reação entre a sílica (dióxido de silício) e o hidróxido de cálcio presente no material. O hidróxido de cálcio nos compósitos cimentícios é proveniente da hidratação inicial incompleta do cimento, atuando como agente limitante da resistência à compressão.

Por sua vez, o efeito filler refere-se ao preenchimento dos vazios da matriz cimentícia através de partículas moídas dos aditivos, contribuindo para a redução da água acumulada sob os agregados e o refinamento da porosidade capilar. Esses mecanismos resultam em uma mais compacta, favorecendo a trabalhabilidade no estado fresco e aprimora propriedades como densidade e permeabilidade no estado endurecido (CHARITHA et al., 2021).

A manifestação desses efeitos está condicionada a uma série de variáveis, como o pré-tratamento do aditivo, a porcentagem substituição do cimento, tipo de cura, idade dos corpos de prova, entre outros fatores. Portanto, diante da complexidade e da interdependência entre as variáveis, não se pode estabelecer uma relação linear entre a resistência à compressão e a proporção de determinado aditivo (CHARITHA et al., 2021).

Na pesquisa realizada por Habibur Rahman Sobuz et al. (2024), foi avaliada a incorporação de BC derivado de resíduo de serragem como material suplementar ao cimento. Foram testados quatro teores de substituição em massa do cimento, 1%, 3%, 5% e 8%. Os resultados indicaram que a substituição do cimento por BC promoveu o aumento da resistência mecânica e da durabilidade da argamassa, atribuídos à atividade pozolânica do material.

Além disso, observou-se também que, por possuir estrutura porosa e atuar como material de enchimento, o BC contribuiu para o preenchimento dos vazios entre as partículas da matriz cimentícia, resultando na redução da absorção de água e na melhoria da trabalhabilidade da argamassa.

Segundo o estudo realizado por Liu; Li; Xu (2022b), foi investigada a substituição parcial do cimento por BC obtido a partir de biomassa de bambu, com objetivo de melhorar as propriedades mecânicas da argamassa. As análises realizadas por Fluorescência de Raios X (FRX) e Difração de Raios X (DRX), indicaram que os principais produtos químicos de oxidação presente no BC de bambu atenderam aos requisitos da classe N – pozolana para concreto, conforme norma ASTM C618-19.

Além disso, o BC de bambu apresentou presença de sílica em forma não cristalina, a qual pode estar associada às reações de hidratação da matriz cimentícia. Dessa forma, esses resultados indicam que o BC de bambu possui potencial para atuar como material pozolânica quando utilizado como aditivo em compósitos cimentícios.

2.2 Biochar

O biochar é um material sólido carbonáceo e poroso, caracterizado por sua alta resistência à decomposição e elevado grau de aromatização. Ele é obtido através da decomposição térmica da biomassa de origem animal ou vegetal ou plantas, realizada na ausência de oxigênio, processo conhecido como pirólise (S; P, 2019). Devido à sua ampla aplicabilidade em diversos setores agrícolas e industriais, o biochar tem despertado crescente interesse nos últimos anos.

Esse material apresenta exibem uma ampla gama de características físico-químicas, que influenciam diretamente suas múltiplas aplicações (AMALINA et al., 2022). Estudos recentes indicam que tanto o tipo de biomassa utilizada quanto o as condições do processo de produção afetam significativamente características como composição elementar, densidade, porosidade e pH, fatores que determinam sua adequação a diferentes finalidades.

O BC tem sido empregado no tratamento de resíduos industriais, atuando na remoção de poluentes orgânicos e inorgânicos, bem como diferentes tipos de corantes e pigmentos de têxteis (ENAIME et al., 2020; NIDHEESH et al., 2021a; SAKHIYA; ANAND; KAUSHAL, 2020a). Na agricultura, é utilizado para melhorar a qualidade do solo (DAFUL; R CHANDRARATNE, 2020). Além disso, devido seu alto teor de carbono, o BC pode ser utilizado como combustível para a geração de energia (YAASHIKAA et al., 2020). A biomassa, por sua vez, tem sido reconhecida como uma fonte promissora de energia renovável, minerais e produtos químicos (SADH; DUHAN; DUHAN, 2018).

Resíduos agrícolas, biomassa de algas, resíduos de colheitas, resíduos de origem animal, lodo ativado e culturas energéticas representam as principais fontes de biomassa como matéria-prima para fins energéticos e industriais (LI et al., 2020; RAUD et al., 2019). Vários métodos físicos, termoquímicos e bioquímicos podem ser aplicadas para transformar essa biomassa em produtos de alto valor agregado.

O biochar é derivado por meio de processos de conversões termoquímicas de biomassa carbonácea, realizados em temperaturas elevadas (entre 300°C e 900 °C) e em condições de oxigênio limitado. Dentre esses processos, destacam-se a pirólise, gaseificação, torrefação e carbonização hidrotérmica (HTC) (NIDHEESH et al., 2021). As propriedades físicas, químicas e mecânicas dos BC variam significativamente em função da matéria-prima e das condições específicas do processo de pirólise (KAZEMI SHARIAT PANAHI et al., 2020).

A disponibilidade local da biomassa é um fator determinante na escolha da matéria-prima, pois influencia diretamente os custos de transporte e contribui para a redução das emissões de CO₂ associadas à cadeia produtiva do BC (W. LI, 2020). Estudos recentes sobre a pirólise de biomassa, descobriram que a geração de biochar depende de diversas variáveis, especialmente do tipo de biomassa, teor de umidade, tamanho de partícula e as condições de reação (temperatura, duração, taxa de aquecimento) (GE et al., 2021; Ponnusamy et al., 2020) e do ambiente (tipo de gás e taxa de fluxo) (LENG et al., 2021) e outras variáveis (catalisador, tipo de reator) (SAKHIYA; ANAND; KAUSHAL, 2020b).

Na produção de biocarvão, existem três principais processos de degradação térmica, que são governados principalmente pela temperatura de pirólise, pelo tempo que o material permanece no reator e pela taxa de aquecimento (rampa de aquecimento). Pirólise lenta é a conversão térmica da biomassa por aquecimento em baixas e médias temperaturas, na ausência de

oxigênio. Pirólise rápida é o aquecimento muito rápido da biomassa, resultando em uma maior proporção de bio-óleo e menor de biocarvão. E a gaseificação é a pirólise em altas temperaturas e tem o biocarvão como subproduto (BROWN et al., 2020). As condições e o rendimento da produção de biocarvão e os produtos gerados no fim do processo são altamente dependentes do tipo de pirólise utilizada.

A composição química e estrutural do BC é altamente heterogênea. Algumas propriedades estão presentes em todos os biochars, incluindo alto teor de carbono e grau de aromaticidade, o que explica seu alto nível de recalcitrância. Contudo, a exata composição química e estrutural é dependente da combinação da matéria-prima e das condições de pirólise

A temperatura de pirólise é considerada o principal parâmetro a ser avaliado no processo de produção do biochar. O teor de carbono fixo do BC está diretamente relacionado ao aumento da temperatura final de pirólise. O mesmo acontece com o teor de cinzas, ou seja, para uma mesma matéria-prima, quanto maior a temperatura de pirólise maior é o teor de cinzas produzido. Enquanto que o rendimento da reprodução de BC é inversamente proporcional à temperatura de pirólise (SOHI et al., 2010).

2.3 Uso do biochar em matriz cimentícia

O biochar é composto por hemicelulose, celulose, lignina e outros compostos orgânicos, cujas proporções variam conforme o tipo de biomassa utilizada como matéria-prima (MA et al., 2019; M. VERMA, 2014). Tais constituintes apresentam estruturas porosas devido ao elevado teor de carbono incorporado e à própria natureza porosa do BC. Essa característica resulta em alta absorção de água, o que pode comprometer a trabalhabilidade do material (CHOI; YUN; LEE, 2012a). Entretanto, esse efeito pode ser controlado por meio da análise da influência do tipo de biomassa e das condições do processo de pirólise, como temperatura, taxa de aquecimento, pressão e temperatura na distribuição dos poros e, conseqüentemente, na microestrutura ou morfologia do BC (BREWER et al., 2014; HYVÄLUOMA et al., 2018; LU; ZONG, 2018; MRAD; CHEHAB, 2019; NEWALKAR et al., 2014).

O BC apresenta composição elementar majoritariamente formada por carbono, hidrogênio, oxigênio, além de pequenas quantidades de nitrogênio e enxofre e outros microelementos, como cálcio, zinco, potássio, magnésio e outros (MALÍŇSKA, 2012). As propriedades físico-químicas do BC variam significativamente em função das condições de produção, especialmente da temperatura de pirólise. Em pirólises relativamente mais baixas, na faixa entre

300 °C e 450°C, a estrutura do BC se torna mais amorfa (NGUYEN et al., 2010; TOMCZYK; SOKOŁOWSKA; BOGUTA, 2020b). Por outro lado, a temperaturas mais elevadas, a partir de 1000 °C resulta na formação de uma estrutura porosa mais acentuada (CHEN et al., 2018), com arranjos irregulares e desordenados (KEILUWEIT et al., 2010). Nesse contexto, fica evidente que estruturas bidimensional regular, como o grafeno, não serão formadas (ATTIA et al., 2021). A ausência dessas estruturas regulares indica que o biochar obtido por pirólise convencional difere substancialmente de materiais grafíticos em termos de organização molecular e comportamento físico-químico.

2.4 Influência do biochar nas propriedades frescas de compósitos cimentícios

A trabalhabilidade pode ser definida em relação à reologia, que se refere ao estudo sistemático do fluxo, estando associada a propriedades reológicas, como tensão de escoamento e viscosidade (GUPTA; TULLIANI; KUA, 2022). Os principais parâmetros reológicos são estabilidade, compatibilidade e mobilidade, sendo definidos levando em consideração as forças ou tensões.

Tais propriedades reológicas do biochar-cimento, incluindo tensão de escoamento estática, tensão de escoamento dinâmica e viscosidade plástica, dependem do tamanho da partícula, porosidade do biochar e dosagem. Misturas altamente trabalháveis, por exemplo, que são suscetíveis a segregação pode ser identificada através do monitorando as taxas de fluxo (RASEKH et al., 2020). Como a água absorvida não se liga quimicamente às partículas de biochar, a adição de biochar faz com que o processo de hidratação no estágio inicial da cura da argamassa ou concreto seja favorecido (CHOI; YUN; LEE, 2012).

Além disso, a capacidade de retenção de água do biochar resulta em melhores propriedades do material e durabilidade da matriz cimentícia. Gupta; Kua (2017) descobriram que, embora a água fosse absorvida pelo biochar em um estágio inicial, durante a cura do concreto, a água absorvida era dissolvida para a pasta circundante, o que é conhecido como efeito reservatório. Esse processo leva à redução da permeabilidade e à melhora da hidratação devido à cura interna. A adição de biochar aumentou a porosidade da mistura cimentícia, que desempenhou um papel vital na regulação do conteúdo de água e da distribuição de água na mistura de cimento. Essa descoberta é consistente com as de (SIRICO et al., 2021).

Além disso, um estudo conduzido para avaliar o processo de hidratação do cimento de magnésia e do cimento binário magnésia-Portland incorporado ao biochar revelou que o processo de

carbonatação foi ainda mais facilitado pela difusão de CO₂ (WANG et al., 2021). Foi relatado que a substituição de mais de 5% da massa de cimento por biochar pode reduzir a trabalhabilidade das misturas de argamassa (CHOI; YUN; LEE, 2012). No entanto, um estudo de Yang; Wang (2021) relatou uma perda de trabalhabilidade mesmo com uma substituição de 2% de biochar.

Além disso, para obter a trabalhabilidade desejada, a quantidade de substituição de biochar a ser usada varia dependendo do nível de perda por ignição do biochar específico (CHOI; YUN; LEE, 2012). Com base nas descobertas, pode-se dizer que a perda de trabalhabilidade se deve principalmente à porosidade elevada do biochar, que pode absorver água durante o processo de mistura.

Os resultados de estudos conduzidos por Gupta; Tulliani; Kua (2022) relataram a evolução dependente do tempo da tensão de escoamento estática do biochar-cimento com duas faixas de tamanho de partícula de biochar, preparadas a partir de casca de coco e resíduos de madeira - biochar mais grosso com faixa de tamanho médio de 45–50 µm e biochar mais fino com faixa de tamanho médio de 10–18 µm. Os autores descobriram que o acúmulo de tensão de escoamento estática no cimento de biochar grosso foi de 1,83–2,74 vezes daquele com biochar mais fino em dosagem semelhante (2% em massa de cimento) e relação água-aglutinante (0,50). A diferença foi atribuída à maior absorção de água pelos macroporos em partículas de biochar mais grossas, levando à redução na espessura da película de água (WFT). A WFT desempenha um papel importante na lubrificação das superfícies de partículas sólidas e na redução da tensão de escoamento de misturas cimentícias.

Vários estudos revelaram os efeitos de microenchimentos na taxa de hidratação. O grau de hidratação do cimento e a cinética da reação foram aumentados pela ação desses microenchimentos (BOUASKER et al., 2008; GOLDMAN; BENTUR, 1993; ZHANG; ISLAM, 2012). Eles atuam principalmente como locais para nucleação heterogênea, levando à formação de produtos de hidratação adicionais. Comportamento semelhante foi observado para biochar por Gupta; Kua; Low (2018).

A resistência inicial dos materiais à base de cimento é influenciada pela taxa de hidratação. Existem dois métodos pelos quais os enchimentos inertes podem influenciar a cinética de hidratação do cimento. Primeiro, a substituição do clínquer por enchimentos aumenta o espaço para a precipitação dos produtos de hidratação. Os próprios enchimentos atuam como locais

para a nucleação dos produtos de hidratação (SCRIVENER; JUILLAND; MONTEIRO, 2015). A adição de biochar tem um impacto substancial na cinética de hidratação dependendo do tamanho de partícula, da matéria-prima e das condições de preparação³ carregados positivamente, onde formam aglomerados de nucleação, resultando em hidratação aprimorada do cimento (GUPTA et al., 2021).

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AGEGNEHU, Getachew; SRIVASTAVA, A. K.; BIRD, Michael I. **The role of biochar and biochar-compost in improving soil quality and crop performance: A review.** Applied Soil Ecology, v. 119, p. 156–170, out. 2017.

AMALINA, Farah *et al.* **A comprehensive assessment of the method for producing biochar, its characterization, stability, and potential applications in regenerative economic sustainability – A review.** Cleaner Materials, v. 3, p. 100045, mar. 2022.

ARIF, Muhammad *et al.* Biochar; a Remedy for Climate Change. **In: Environment, Climate, Plant and Vegetation Growth.** Cham: Springer International Publishing, 2020. p. 151–171.

ATTIA, Nour F. *et al.* **Recent advances in graphene sheets as new generation of flame retardant materials.** Materials Science and Engineering: B, v. 274, p. 115460, dez. 2021.

BANDEIRA, Renata Albergaria de Mello; MELLO, Luiz Carlos Brasil de Brito; MAÇADA, Antonio Carlos Gastaud. **Relacionamento interorganizacional na cadeia de suprimentos: um estudo de caso na indústria da construção civil.** Production, v. 19, n. 2, p. 376–387, 2009.

BAO, Zhikang; LEE, Wendy M. W.; LU, Weisheng. **Implementing on-site construction waste recycling in Hong Kong: Barriers and facilitators.** Science of The Total Environment, v. 747, p. 141091, dez. 2020.

BARROW, C. J. Biochar: **Potential for countering land degradation and for improving agriculture.** Applied Geography, v. 34, p. 21–28, maio 2012.

BOUASKER, M. *et al.* **Chemical shrinkage of cement pastes and mortars at very early age: Effect of limestone filler and granular inclusions.** *Cement and Concrete Composites*, v. 30, n. 1, p. 13–22, jan. 2008.

BOUMAAZA, Messaouda *et al.* **Optimization of flexural properties and thermal conductivity of Washingtonia plant biomass waste biochar reinforced bio-mortar.** *Journal of Materials Research and Technology*, v. 23, p. 3515–3536, mar. 2023.

BREWER, Catherine E. *et al.* **New approaches to measuring biochar density and porosity.** *Biomass and Bioenergy*, v. 66, p. 176–185, jul. 2014.

BROWN, Aaron E. *et al.* **An Assessment of Different Integration Strategies of Hydrothermal Carbonisation and Anaerobic Digestion of Water Hyacinth.** *Energies*, v. 13, n. 22, p. 5983, 16 nov. 2020.

CHARITHA, V. *et al.* **Use of different agro-waste ashes in concrete for effective upcycling of locally available resources.** *Construction and Building Materials*, v. 285, p. 122851, maio 2021.

CHEN, Weifeng *et al.* **Sorption of chlorinated hydrocarbons to biochars in aqueous environment: Effects of the amorphous carbon structure of biochars and the molecular properties of adsorbates.** *Chemosphere*, v. 210, p. 753–761, nov. 2018.

CHOI, Won Chang; YUN, Hyun Do; LEE, Jae Yeon. **Mechanical Properties of Mortar Containing Bio-Char From Pyrolysis.** *Journal of the Korea institute for structural maintenance and inspection*, v. 16, n. 3, p. 67–74, 30 maio 2012.

DAFUL, Asfaw G.; R CHANDRARATNE, Meegalla. **Biochar Production From Biomass Waste-Derived Material.** *In: Encyclopedia of Renewable and Sustainable Materials. [S.l.]: Elsevier, 2020. p. 370–378.*

DOWNIE, ADRIANA *et al.* **Biochar as a Geoengineering Climate Solution: Hazard Identification and Risk Management.** *Critical Reviews in Environmental Science and Technology*, v. 42, n. 3, p. 225–250, fev. 2012.

ENAIIME, Ghizlane *et al.* **Biochar for Wastewater Treatment—Conversion Technologies and Applications.** Applied Sciences, v. 10, n. 10, p. 3492, 18 maio 2020.

GE, Shengbo *et al.* **Progress in microwave pyrolysis conversion of agricultural waste to value-added biofuels: A batch to continuous approach.** Renewable and Sustainable Energy Reviews, v. 135, p. 110148, jan. 2021.

GOLDMAN, A.; BENTUR, A. **The influence of microfillers on enhancement of concrete strength.** Cement and Concrete Research, v. 23, n. 4, p. 962–972, jul. 1993.

GUPTA, Souradeep *et al.* **Carbon sequestration in cementitious composites using biochar and fly ash – Effect on mechanical and durability properties.** Construction and Building Materials, v. 291, p. 123363, jul. 2021.

GUPTA, Souradeep; KUA, Harn Wei. **Factors Determining the Potential of Biochar a Carbon Capturing and Sequestering Construction Material: Critical Review.** Journal of Materials in Civil Engineering, v. 29, n. 9, set. 2017.

GUPTA, Souradeep; KUA, Harn Wei; LOW, Chin Yang. **Use of biochar as carbon sequestering additive in cement mortar.** Cement and Concrete Composites, v. 87, p. 110–129, mar. 2018.

GUPTA, Souradeep; TULLIANI, Jean-Marc; KUA, Harn Wei. **Carbonaceous admixtures in cementitious building materials: Effect of particle size blending on rheology, packing, early age properties and processing energy demand.** Science of The Total Environment, v. 807, p. 150884, fev. 2022.

HABIBUR RAHMAN SOBUZ, Md. *et al.* **Assessment of mechanical properties with machine learning modeling and durability, and microstructural characteristics of a biochar-cement mortar composite.** Construction and Building Materials, v. 411, p. 134281, jan. 2024.

HYVÄLUOMA, Jari *et al.* **Effects of pyrolysis temperature on the hydrologically relevant porosity of willow biochar.** *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, v. 134, p. 446–453, set. 2018.

JINDO, K. *et al.* **Physical and chemical characterization of biochars derived from different agricultural residues.** *Biogeosciences*, v. 11, n. 23, p. 6613–6621, 1 dez. 2014.

KAZEMI SHARIAT PANAHI, Hamed *et al.* **A comprehensive review of engineered biochar: Production, characteristics, and environmental applications.** *Journal of Cleaner Production*, v. 270, p. 122462, out. 2020.

KEILUWEIT, Marco *et al.* **Dynamic Molecular Structure of Plant Biomass-Derived Black Carbon (Biochar).** *Environmental Science & Technology*, v. 44, n. 4, p. 1247–1253, 15 fev. 2010.

KHAN, Mohammad Iqbal. **Nanostructure and Microstructure of Cement Concrete Incorporating Multicementitious Composites.** *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, v. 2141, n. 1, p. 21–27, 1 jan. 2010.

LEHMANN, Johannes; JOSEPH, Stephen (ORGS.). **Biochar for Environmental Management.** [S.l.]: Routledge, 2015.

LENG, Lijian *et al.* **An overview on engineering the surface area and porosity of biochar.** *Science of The Total Environment*, v. 763, p. 144204, abr. 2021.

LI, Huanyu *et al.* **Biochar for sustainable construction industry. In: Current Developments in Biotechnology and Bioengineering.** [S.l.]: Elsevier, 2023. p. 63–95.

LIU, S. H. ; LENG, F. G. ; LI, L. H. **Supplementary Cementitious Materials Used in Concrete.** [S.l.: S.n.].

LIU, Wen; LI, Kangning; XU, Shilang. **Utilizing bamboo biochar in cement mortar as a bio-modifier to improve the compressive strength and crack-resistance fracture ability.** *Construction and Building Materials*, v. 327, p. 126917, abr. 2022.

LI, Yunchao *et al.* **A critical review of the production and advanced utilization of biochar via selective pyrolysis of lignocellulosic biomass.** *Bioresource Technology*, v. 312, p. 123614, set. 2020.

LU, Shenggao; ZONG, Yutong. **Pore structure and environmental serves of biochars derived from different feedstocks and pyrolysis conditions.** *Environmental Science and Pollution Research*, v. 25, n. 30, p. 30401–30409, 29 out. 2018.

MALIŃSKA, Krystyna. **Biowęgiel odpowiedzią na aktualne problemy ochrony środowiska. Inżynieria i ochrona środowiska. [S.l.: S.n.].** v. 15

MA, Zhongqing *et al.* **In-depth comparison of the physicochemical characteristics of biochar derived from biomass pseudo components: Hemicellulose, cellulose, and lignin.** *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, v. 140, p. 195–204, jun. 2019.

MONA, Sharma *et al.* **Towards sustainable agriculture with carbon sequestration, and greenhouse gas mitigation using algal biochar.** *Chemosphere*, v. 275, p. 129856, jul. 2021.

MOTA, F. A. S. *et al.* **Pirólise da biomassa lignocelulósica: uma revisão.** *Revista Gestão Inovação e Tecnologias*, v. 5, n. 4, p. 2511–2525, 3 dez. 2015.

MRAD, Rayane; CHEHAB, Ghassan. **Mechanical and Microstructure Properties of Biochar-Based Mortar: An Internal Curing Agent for PCC.** *Sustainability*, v. 11, n. 9, p. 2491, 28 abr. 2019.

MUÑOZ, Maria *et al.* **PCDD/F determination in sewage sludge composting. Influence of aeration and the presence of PCP.** *Science of The Total Environment*, v. 616–617, p. 763–773, mar. 2018.

M. VERMA, N. M'hamdi, Z. Dkhili, SK Brar, K. Misra. **Thermochemical Transformation of Agro-Biomass into Biochar: Simultaneous Carbon Sequestration and Soil Amendment.** *Biotransformation of Waste Biomass into High Value Biochemicals.* New York, NY: Springer New York, 2014.

NAÇÕES UNIDAS. **Departamento de Assuntos Econômicos e Sociais, Revisão das Perspectivas da População Mundial.**

NEWALKAR, Gautami *et al.* **Effect of Temperature, Pressure, and Residence Time on Pyrolysis of Pine in an Entrained Flow Reactor.** *Energy & Fuels*, v. 28, n. 8, p. 5144–5157, 21 ago. 2014.

NGUYEN, Binh Thanh *et al.* **Temperature Sensitivity of Black Carbon Decomposition and Oxidation.** *Environmental Science & Technology*, v. 44, n. 9, p. 3324–3331, 1 maio 2010.

NIDHEESH, P. V. *et al.* **Potential role of biochar in advanced oxidation processes: A sustainable approach.** *Chemical Engineering Journal*, v. 405, p. 126582, fev. 2021.

NOAMAN, Md. Abu; KARIM, Md. Rezul; ISLAM, Md. Nazrul. **Comparative study of pozzolanic and filler effect of rice husk ash on the mechanical properties and microstructure of brick aggregate concrete.** *Heliyon*, v. 5, n. 6, p. e01926, jun. 2019.

PANG, Xijun *et al.* **Enhancing fire resistance: Investigating mechanical properties of biochar-infused concrete under elevated temperatures.** *Construction and Building Materials*, v. 435, p. 136813, jul. 2024.

PANWAR, N. L.; PAWAR, Ashish; SALVI, B. L. **Comprehensive review on production and utilization of biochar.** *SN Applied Sciences*, v. 1, n. 2, p. 168, 18 fev. 2019.

PONNUSAMY, Vinoth Kumar *et al.* **Review on sustainable production of biochar through hydrothermal liquefaction: Physico-chemical properties and applications.** *Bioresource Technology*, v. 310, p. 123414, ago. 2020.

QIAN, Kezhen *et al.* **Recent advances in utilization of biochar. Renewable and Sustainable.** *Energy Reviews*, v. 42, p. 1055–1064, fev. 2015.

RASEKH, Haleh *et al.* **Rheology and workability of SCC. In: Self-Compacting Concrete: Materials, Properties and Applications.** [S.l.]: Elsevier, 2020. p. 31–63.

RAUD, M. *et al.* **Potentials and challenges in lignocellulosic biofuel production technology.** Renewable and Sustainable Energy Reviews, v. 111, p. 44–56, set. 2019.

RESTUCCIA, Luciana *et al.* **Mechanical characterization of different biochar-based cement composites.** Procedia Structural Integrity, v. 25, p. 226–233, 2020.

ROBERTS, Kelli G. *et al.* **Life Cycle Assessment of Biochar Systems: Estimating the Energetic, Economic, and Climate Change Potential.** Environmental Science & Technology, v. 44, n. 2, p. 827–833, 15 jan. 2010.

SADH, Pardeep Kumar; DUHAN, Surekha; DUHAN, Joginder Singh. **Agro-industrial wastes and their utilization using solid state fermentation: a review.** Bioresources and Bioprocessing, v. 5, n. 1, p. 1, 2 dez. 2018.

SAKHIYA, Anil Kumar; ANAND, Abhijeet; KAUSHAL, Priyanka. **Production, activation, and applications of biochar in recent times.** Biochar, v. 2, n. 3, p. 253–285, 12 set. 2020.

SCRIVENER, Karen L.; JUILLAND, Patrick; MONTEIRO, Paulo J. M. **Advances in understanding hydration of Portland cement.** Cement and Concrete Research, v. 78, p. 38–56, dez. 2015.

SIRICO, Alice *et al.* **Mechanical characterization of cement-based materials containing biochar from gasification.** Construction and Building Materials, v. 246, p. 118490, jun. 2020.

SIRICO, Alice *et al.* **Biochar from wood waste as additive for structural concrete.** Construction and Building Materials, v. 303, p. 124500, out. 2021.

SISMAN, Mehmet *et al.* **The effect of nano-biochar produced from various raw materials on flow and mechanical properties of mortar.** Construction and Building Materials, v. 416, p. 135040, fev. 2024.

SMITH, Pete. **Soil carbon sequestration and biochar as negative emission technologies.** Global Change Biology, v. 22, n. 3, p. 1315–1324, 6 mar. 2016.

SOHI, S. P. *et al.* **A Review of Biochar and Its Use and Function in Soil.** *In: [S.l.: S.n.].* p. 47–82.

S, Rangabhashiyam.; P, Balasubramanian. **The potential of lignocellulosic biomass precursors for biochar production: Performance, mechanism and wastewater application—A review.** *Industrial Crops and Products*, v. 128, p. 405–423, fev. 2019.

TOMCZYK, Agnieszka; SOKOŁOWSKA, Zofia; BOGUTA, Patrycja. **Biochar physicochemical properties: pyrolysis temperature and feedstock kind effects.** *Reviews in Environmental Science and Bio/Technology*, v. 19, n. 1, p. 191–215, 5 mar. 2020.

WANG, Lei *et al.* **Roles of Biochar and CO₂ Curing in Sustainable Magnesia Cement-Based Composites.** *ACS Sustainable Chemistry & Engineering*, v. 9, n. 25, p. 8603–8610, 28 jun. 2021.

WEI, Haoran *et al.* **Granular Bamboo-Derived Activated Carbon for High CO₂ Adsorption: The Dominant Role of Narrow Micropores.** *ChemSusChem*, v. 5, n. 12, p. 2354–2360, 6 dez. 2012.

W. LI, B. Mu, Y. Yang. **Viabilidade da tecnologia de biorrecursos para tratamento em escala industrial de águas residuais de corantes por meio da tecnologia de bioadsorção.** p. 157–170, 2020.

YAASHIKAA, P. R. *et al.* **A critical review on the biochar production techniques, characterization, stability and applications for circular bioeconomy.** *Biotechnology Reports*, v. 28, p. e00570, dez. 2020.

YANG, C. C.; CHO, S. W. **An electrochemical method for accelerated chloride migration test of diffusion coefficient in cement-based materials.** *Materials Chemistry and Physics*, v. 81, n. 1, p. 116–125, jul. 2003.

YANG, Xu; WANG, Xiao-Yong. **Hydration-strength-durability-workability of biochar-cement binary blends.** *Journal of Building Engineering*, v. 42, p. 103064, out. 2021.

ZHANG, Min-Hong; ISLAM, Jahidul. **Use of nano-silica to reduce setting time and increase early strength of concretes with high volumes of fly ash or slag.** *Construction and Building Materials*, v. 29, p. 573–580, abr. 2012.

3 INVESTIGAÇÃO DO DESEMPENHO FÍSICO-MECÂNICO EM ARGAMASSA DE REVESTIMENTO COM SUBSTITUIÇÃO DA AREIA POR BIOCHAR

3.1 INTRODUÇÃO

A indústria da construção civil é responsável por gerar um grande volume de resíduos sólidos. Tais resíduos são constituídos por descartes produzidos na execução de novos edifícios, reformas ou até mesmo demolições, sendo formados por concretos, argamassas, plásticos, madeiras, dentre outros. Tais resíduos são destinados a lixões ou aterros sanitários, o que tem gerado impactos ambientais.

Segundo a *Construction and Demolition Recycling Association* (CDRA) dentre os resíduos gerados na construção Civil, a madeira corresponde cerca de 20-30% do total de resíduos gerados, sendo o segundo tipo mais importante. Segundo o Panorama de Resíduos Sólidos publicado em 2022, foram produzidos cerca de 48 milhões de toneladas de resíduos de construção e demolição (RCD) em 2021. Dessa forma, 30% de todo o resíduo produzido no país advém da construção civil.

Além dos impactos ambientais gerados pelo setor da construção civil, também existem os impactos relacionados à remoção de matérias-primas. De acordo com Tam (2009) e Wu et al. (2020), a mineração de agregados convencionais, tais como rocha e areia, resulta na destruição da vegetação superficial, e causando poluição do ambiente. Sobretudo, a fonte de matérias-primas, como cascalho e areia, está enfrentando o risco de esgotamento, devido à crescente demanda por mineração de agregado. Portanto, gera a necessidade da utilização de resíduos biológicos como substitutos totais ou parciais de agregados naturais, possibilitando mitigar a poluição ambiental através da reciclagem de resíduos, além de promover a redução de aterros sanitários (WU et al., 2020).

O biochar surge como uma solução viável e interessante já que além dos benefícios ambientais, caracterizado pela captura de CO₂ (AKINYEMI; ADESINA, 2020; GUPTA; KUA; LOW, 2018), observa-se também que as partículas do biochar podem ser facilmente inseridas em argamassas e concretos, e obter um aumento das propriedades mecânicas e de durabilidade (CUTHBERTSON et al., 2019; DIXIT; VERMA; PANG, 2021; PRANEETH et al., 2021).

O biochar se caracteriza por ser um produto que passa por um processo termoquímico denominado pirólise. Esse processo pode ser dividido em duas etapas. A primeira etapa é caracterizada pela quebra térmica das ligações químicas ocasionadas pela termólise da biomassa. Durante essa etapa, podem submeter-se as reações adicionais como quebra de ligações, de onde surgem os compostos voláteis, fase gasosa, e ainda podem promover reações de condensação/polimerização para formarem compostos maiores (fase líquida e sólida dos produtos). Na segunda etapa da pirólise, as espécies voláteis continuam sofrendo reações heterogêneas com os sólidos residuais e/ou reações homogêneas em fase gasosa (WANG et al., 2020).

Dessa forma, a substituição da areia por biochar na produção de argamassas torna-se uma abordagem interessante, visto que a argamassa é um material cimentício largamente utilizado na construção civil. Na pesquisa desenvolvida por Maljaee et al. (2022), foram realizadas taxas de substituição de 25%, 45% e 60% já que o objetivo foi desenvolver uma argamassa leve. Os resultados para as substituições foram favoráveis, não comprometendo o desempenho mecânico da argamassa e indicando efeitos promissores na redução das cargas permanentes e na melhoria do isolamento térmico e acústico.

O objetivo deste estudo foi investigar a viabilidade da incorporação de partículas grossas de biochar, utilizando a biomassa eucalipto, em substituição à areia na argamassa de revestimento. Para a produção do biochar, a biomassa foi submetida a três temperaturas de queima, pois, segundo Cosentino et al. (2019); Sirico et al. (2020) a temperatura de queima é um fator fundamental que influencia na eficácia da utilização do biochar em matrizes cimentícias. De acordo com Canal et al. (2016), durante o processo de queima, ocorrem diferentes reações dependendo da temperatura: entre 100 °C e 250°C, há uma eliminação da água higroscópica e de constituição; entre 250°C e 330°C, ocorre a destruição da hemicelulose, entre 370°C e 450°C, ocorre a degradação da lignina; e, após 450°C a estabilização é alcançada devido à resistência térmica da lignina, o que favorece a fixação de carbono no biochar. Dessa forma, as temperaturas de queima adotadas foram 450°C, 650°C e 750°C, com teores de substituição da areia pelo biochar em 10% e 20% da massa da areia.

3.2 MATERIAIS E MÉTODOS

3.2.1 Cimento e agregados finos utilizados

O cimento Portland, segundo a ASTM C595 tipo IS (<70) CP II E-32, foi utilizado para produzir as argamassas. A Tabela 01 refere-se à caracterização realizada no cimento, massa específica conforme NBR 16605 (ABNT, 2017) módulo de finura e superfície específica, conforme Tabela 1.

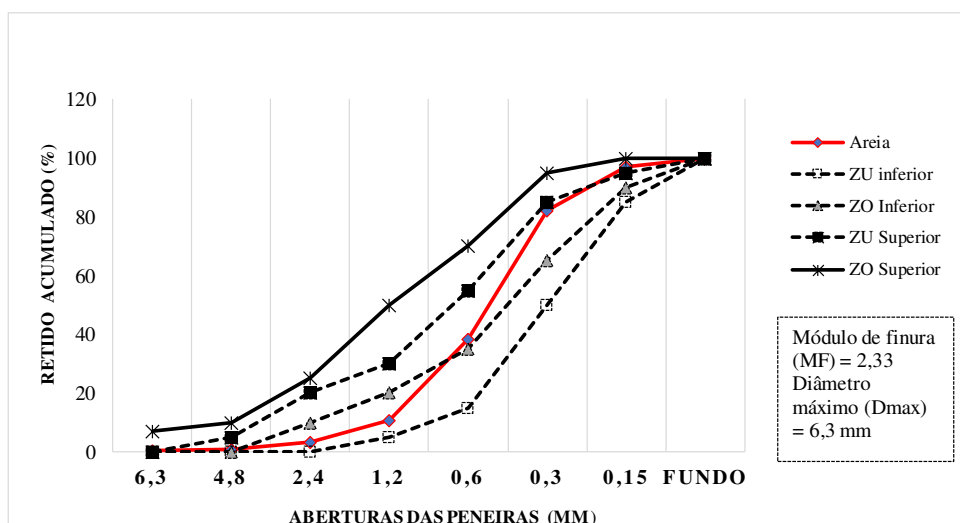
Tabela 1- Caracterização do cimento segundo a NBR 16605:2017

Caracterização	Cimento	Unidade
Massa específica	3,01	g/cm ³
Módulo de finura na peneira #200	0,97	%
Superfície específica	1.584	cm ² /g

Fonte: Autora (2024)

A análise granulométrica da areia e a determinação do módulo de finura foram realizadas através do peneiramento manual, segundo a NBR 7211 (ABNT, 2009), e a massa específica foi determinada pelo método do frasco de Chapman, segundo a NBR 9776 (ABNT, 1987). A areia utilizada obteve um módulo de finura de 2,33, de acordo com o Figura 1. Assim, é possível observar que a areia se encontra entre a zona superior utilizável passando pela zona ótima e seu limite inferior encontra-se na zona inferior utilizável.

Figura 1- Caracterização da areia



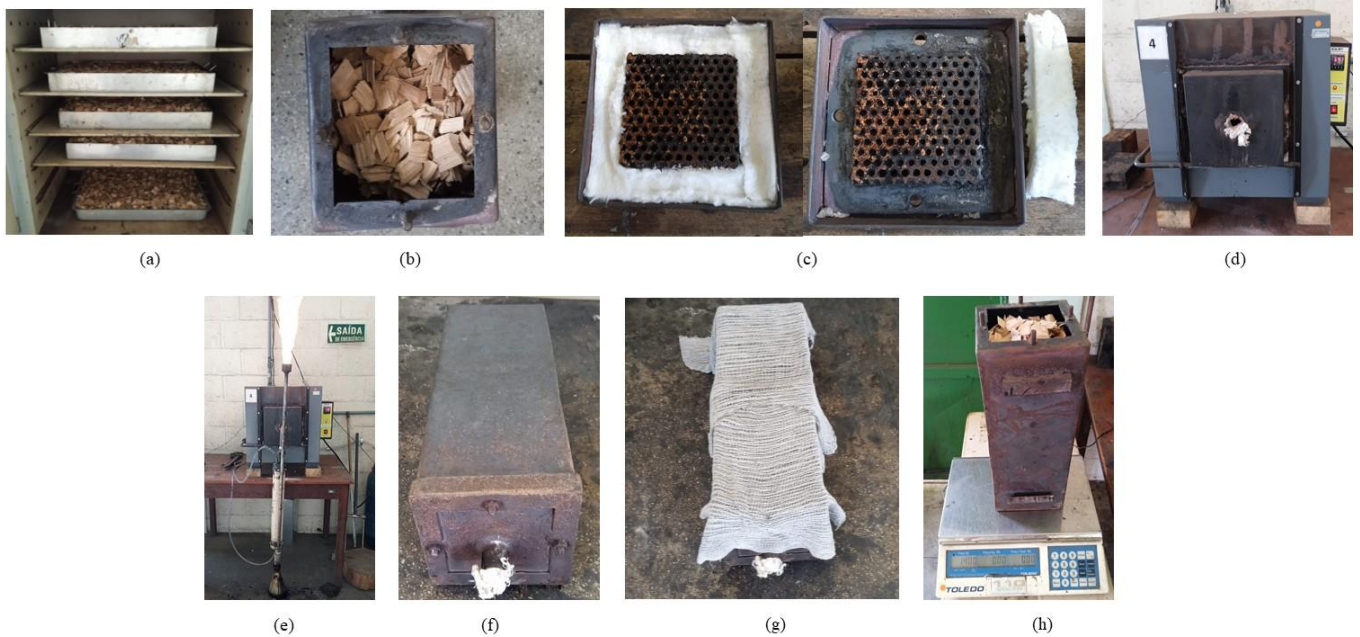
Fonte: Autora (2024)

Além disso, foi utilizada a cal hidratada na argamassa de revestimento, a massa específica encontrada em sua caracterização foi de 2,51 g/cm³. Por fim, a água usada neste estudo foi água do sistema de abastecimento da UFV.

3.2.2 Processo de produção do Biochar (BC)

O biochar (BC) empregado neste estudo é um subproduto da pirólise do eucalipto. Inicialmente, a biomassa (NAT) de eucalipto foi submetida a secagem em estufa à 70°C por um período de 48 h (Figura 2a), com o objetivo de reduzir o teor de umidade e a eficiência do processo pirolítico. Após a secagem, realizou-se a pesagem da amostra. Para isso, a cápsula retangular foi posicionada sob a balança, realizando-se a tara do recipiente. Em seguida, o material foi inserido até preencher cerca de 95% da capacidade do recipiente (Figura 2b). O recipiente foi vedado com fibra de vidro (Figura 2c), sendo as porcas devidamente rosqueadas para garantir a estanqueidade do sistema. Finalizada a montagem da cápsula, o forno mufla foi ligado e programado para atingir a temperatura preestabelecida, conforme Figura 2d. Após a estabilização térmica, a cápsula foi inserida no forno, e deu-se o início da montagem do condensador e a queima (Figura 2e), completando-se o sistema experimental. O processo de pirólise durou um período contínuo de 1 hora.

Finalizado esse tempo, o equipamento foi desligado e iniciou-se o processo de desmontagem e resfriamento. Primeiramente, se a curva do condensador foi removida, e, em seguida um pedaço de estopa umedecido foi inserido na abertura da cápsula (Figura 2f). Para acelerar o processo de resfriamento, a cápsula foi envolta com um pano úmido (Figura 2g), e mantida em repouso em temperatura ambiente por um período de aproximadamente uma hora. Ao finalizar o resfriamento, o material foi retirado da cápsula e novamente, pesado (Figura 2h) a fim de quantificar a perda em massa após o processo de pirólise. Constatou-se que a perda média de 30% da massa inicial da biomassa processada.

Figura 2 – Processo de produção BC

Fonte: Autora (2024)

3.2.3 Processo de moagem do Biochar (BC)

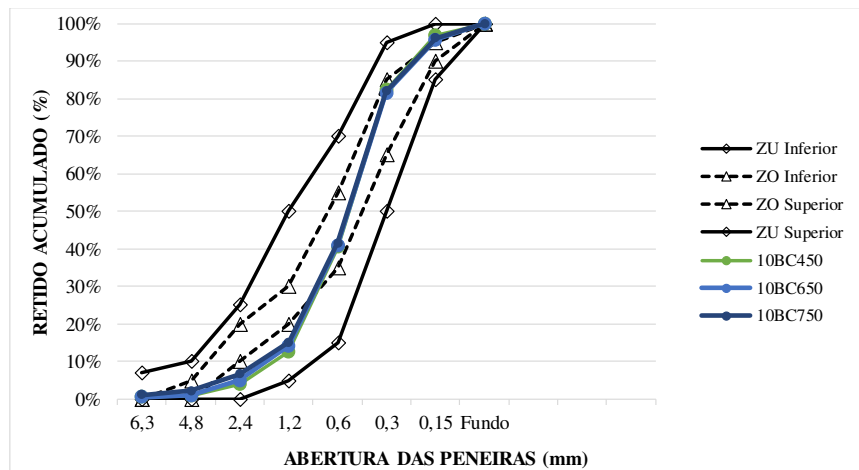
Após a conclusão do processo de produção do biochar (BC) nas temperaturas preestabelecidas, iniciou-se o processo de moagem do BC para incorporar à argamassa. Para esse processo, foi utilizado o moinho de bolas Marconi, com a padronização da quantidade de bolas e massa do material inserida nas cápsulas. Foram colocadas 20 esferas e 300 g de material a uma velocidade de 160 rpm. O tempo de moagem variou para cada temperatura conforme Tabela 2, afim de alcançar a granulometria próxima à Zona Utilizável e/ou Zona Ótima. A Figura 3 apresenta a composição da areia com 10% de substituição por biochar, enquanto a Figura 4 mostra a composição da areia com 20% de substituição por biochar.

Tabela 2 – Tempo de moagem do BC

BC	Tempo de moagem (min.)
BC450	00:19:00
BC650	00:41:00
BC750	00:38:00

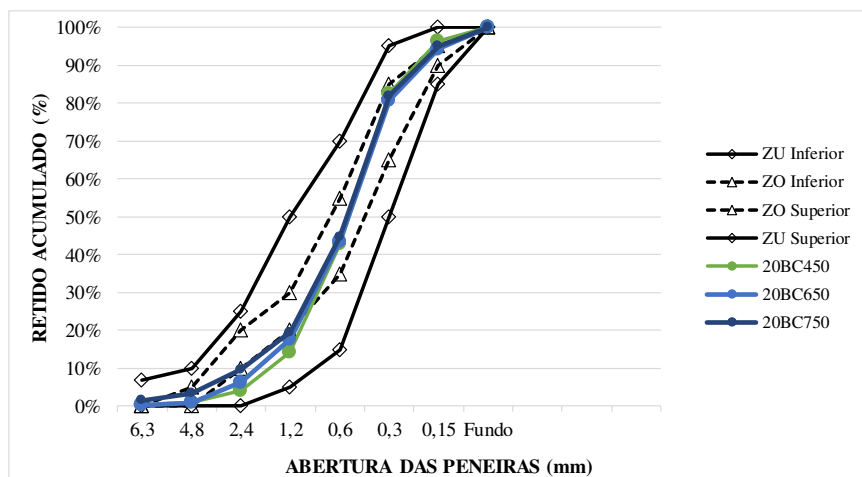
Fonte: Autora (2024)

Figura 3 – Moagem do 10BC



Fonte: Autora (2024)

Figura 4 – Moagem do 20BC



Fonte: Autora (2024)

3.2.4 Análise Química Imediata do Biochar (BC)

Os procedimentos utilizados para a análise química imediata basearam-se na norma ASTM – D1762 – 84 (2021), utilizando o biochar moído que passou na peneira de 40 mesh e ficou recolhido na de 60 mesh. A análise refere-se ao conjunto de testes que determinam as principais características físico-químicas do material analisado, como resultado obtem-se o teor de cinzas, materiais voláteis e carbono fixo. Nessa análise foram realizadas uma duplicata para cada amostra, conforme Tabela 3. O teor de cinzas representa os compostos que vaporizam quando o biochar é aquecido em atmosfera inerte, dessa forma quanto menor o teor de voláteis, maior a estabilidade do biochar no solo, por exemplo. Já o teor de cinzas refere-se aos resíduos

inorgânicos após a combustão completa. Já o carbono fixo, refere-se ao carbono remanescente após a liberação dos voláteis e remoção da umidade, representando a fração mais estável e duradoura do biochar.

Tabela 3 – Análise Química Imediata do BC e NAT

ID	% voláteis	% cinzas	% carbono fixo
NAT	84,2	0,2175	15,5445
BC450	19,2	0,9975	79,758
BC650	6,8	1,286	91,94
BC750	5,5	1,4055	93,052

Fonte: Autora (2024)

3.2.5 Área superficial, porosidade, granulometria à laser, massa específica e espectroscopia no infravermelho por transformada de Fourier (FTIR)

A área superficial específica e o volume de poros do biochar moídos foram determinados empregando adsorção multiponto usando o método Brunauer-Emmett-Teller (BET), através do equipamento Nova 600 BET (Anton Paar) - Analisador de área superficial e volume de poros. Amostras de biochar, cerca de 0,15 g, foram desgaseificadas por 8 h a 105°C, antes do BET. O método t-Plot foi usado para determinar a área superficial do microporo (considerando que microporos são menores que 2 nanômetros), enquanto para determinar o volume dos mesoporos foi utilizado a teoria de Barrett-Joyner-Halenda (BJH).

A granulometria à laser foi realizada através do equipamento Granulômetro à laser Mastersizer 2000, na Universidade Federal de Ouro Preto (UFOP). Para a determinações das massas específicas para as amostras de biochar BC450-BC650-BC750 e da biomassa (NAT) seguiu-se a norma NBR 16605:2017, que estabelece o método de ensaio para determinação da massa específica do cimento. E a análise do espectro infravermelho com Transformada de Fourier (FTIR) foi realizado utilizando o equipamento Espectrômetro Infravermelho com Transformada de Fourier, no laboratório de Nanomateriais e Química Ambiental LaNaQua da Universidade Federal de Viçosa (UFV).

3.2.6 Análise de pozolanicidade do BC – Método Chapelle

A determinação do índice de pozolanicidade das amostras de BC foi através do método Chapelle conforme a norma ABNT NBR 15895:2010. O ensaio consiste em manter em agitação uma mistura de um grama de adição mineral e dois grammas de óxido de cálcio (CaO) em 250

ml de água, acondicionada em um Erlenmeyer polimérico, por um período de 16 ± 2 horas, à uma temperatura de (90 ± 5) °C. O resultado é expresso através da quantidade de hidróxido de cálcio fixado por grama de adição mineral.

3.2.7 Análise de Microscopia do BC e dos corpos de prova (CP's)

As análises microscópicas foram realizadas em quatro amostras: BC450, BC650, BC750 e NAT. As imagens das amostras de BC foram obtidas utilizando o Microscópio Eletrônico de Varredura modelo JEOL JSM-6010LA, localizado no Laboratório de Microscopia Eletrônica de Varredura, vinculado ao Departamento de Física (DPF) da UFV. Além disso, análises também foram realizadas nos corpos de prova rompidas aos 28 dias de cura.

3.2.8 Projeto de argamassa e proporção da mistura

As misturas de argamassas foram preparadas a partir do traço de 1:1:6 (cimento:cal:areia) em volume e 1:0,62:7,37 em massa, conforme Tabela 4. Foram substituídos 10% e 20% de areia por BC em massa, para três temperaturas de queima 450 °C, 650 °C e 750 °C. As argamassas estão identificadas pelo código “XBCY”, onde o X é o teor de substituição e Y é a temperatura de queima, e a argamassa de referência (REF), sem incorporação de BC. Essas dosagens foram selecionadas com base em testes preliminares realizado pelo autor. Os corpos de prova foram curados em câmara úmida até a idade dos ensaios.

Tabela 4 - Traço em massa das misturas

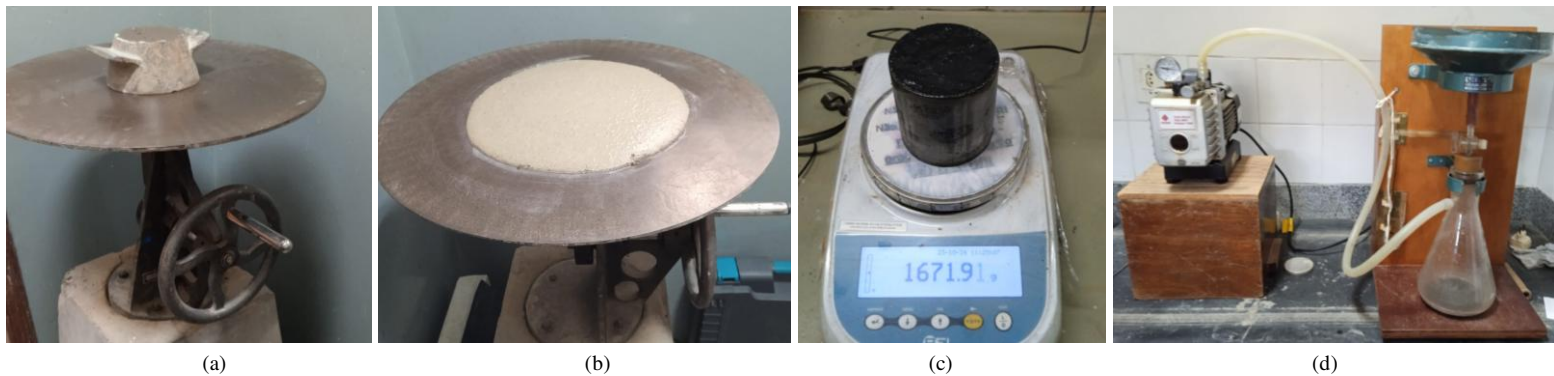
ID da mistura	Cimento (kg)	Agregado (kg)	Cal (kg)	Água (Kg)	BC (kg)
REF	1	7,382	0,621	1,6	*
10BC450	1	6,642	0,621	2,7	0,738
10BC650	1	6,642	0,621	3,3	0,738
10BC750	1	6,642	0,621	2,5	0,738
20BC450	1	5,906	0,621	3,4	1,477
20BC650	1	5,906	0,621	3,7	1,477
20BC750	1	5,906	0,621	3,6	1,477

Fonte: Autora (2024)

3.2.9 Avaliação da argamassa em seu estado fresco

As argamassas foram ensaiadas no estado fresco, sendo avaliadas a trabalhabilidade, o índice de consistência e a massa específica. A trabalhabilidade foi avaliada indiretamente através da determinação do índice de consistência (NBR 7215, 1996) utilizando uma mesa de ensaio, de acordo com a Figura 4 (a, b). O ensaio da massa específica foi determinado através da norma NBR 13278 (2005), de acordo com a Figura 4 (c). Já o ensaio para determinação da retenção de água foi realizado conforme a NBR 13277 (2005). O Funil de Buchner, bomba de vácuo e demais equipamentos utilizados são apresentados nas Figura 4 (d).

Figura 5 – (a, b) Mesa de ensaio para determinação do índice de consistência da argamassa. (c) Equipamentos utilizado para a determinação da massa específica. (d) Equipamentos utilizados para a determinação da retenção de água.



Fonte: Autora (2024)

3.2.10 Avaliação da argamassa em seu estado endurecido

Para cada mistura de argamassa foram moldados 12 corpos de prova prismático 40 x 40 x 160 mm. A argamassa foi preparada conforme NBR 13276 (2005) para serem usados no ensaio à tração na flexão (Figura 5 (a)) e à compressão de acordo com a norma NBR 13279 (2005). Os corpos de prova de argamassa foram mantidos em câmara úmida até a data da realização dos ensaios. Os corpos de prova prismáticos foram ensaiados em uma prensa manual nas idades de 7, 14, 28 e 56 dias. As duas partes de cada corpo de prova resultante desse ensaio foram ensaiadas à compressão, utilizando também em equipamento manual com leitura analógica (NBR 13279, 2005), de acordo com a Figura 5 (b).

Figura 6 – (a) Teste tração na flexão. (b) Teste à compressão.



(a)

(b)

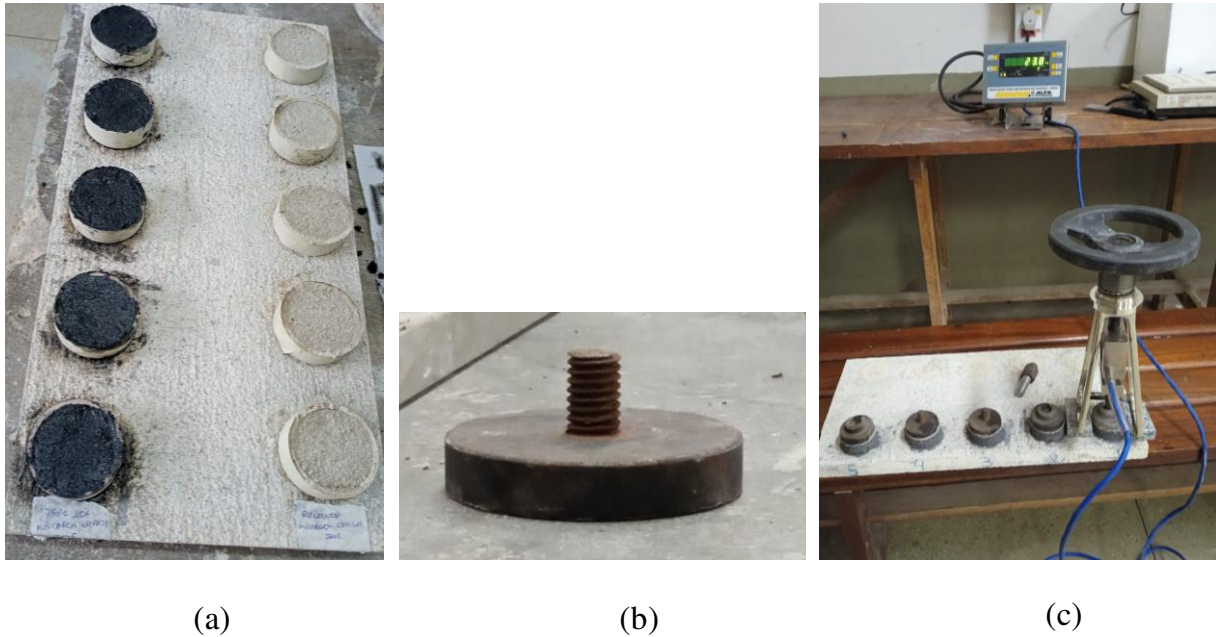
Fonte: Autora (2024)

3.2.11 Avaliação da resistência de aderência à tração

Para a realização da determinação de aderência, foi adotada a NBR 13528:2019. Foram moldados 6 corpos de prova para cada traço de argamassa. As moldagens foram realizadas em uma placa de concreto padrão, conforme Figura 7 (a). Após 48 h da moldagem, os corpos de prova foram desmoldados, e as pastilhas metálicas (Figura 7b), foram fixadas por meio de um adesivo bicomponente à base de resina epóxi. A cura foi realizada em câmara úmida por 28 dias, contados a partir do dia da moldagem. Passados os 28 dias de cura, foram realizados os ensaios de resistência de aderência. O equipamento utilizado para a execução do ensaio foi um aparelho para ensaio de arrancamento portátil com manômetro digital integrado, da marca alfa instrumentos. O ensaio foi realizado no laboratório de materiais do Departamento de Engenharia Civil da Universidade Federal de Viçosa, conforme ilustrado na Figura 7 (c).

Conforme recomendação na NBR 13528-2 (ABNT, 2019), o tipo de ruptura foi registrado, bem como o percentual de argamassa que ficou retido no substrato, para o caso de ruptura na interface argamassa colante/substrato. A partir desse parâmetro foi possível inferir sobre o percentual de extensão de aderência entre a argamassa e o substrato.

Figura 7 – (a) Moldagem dos corpos de prova para determinação da aderência. (b) Pastilha metálica. (c) Equipamentos utilizado para a determinação da aderência.



Fonte: Autora (2024)

3.2.12 Avaliação de absorção por capilaridade

Para o ensaio de absorção de água por capilaridade foram moldados 3 corpos de prova para cada traço de argamassa, conforme norma ABNT NBR 13279:2005. Os corpos de prova, conforme a Figura 7, foram ensaiados aos 28 dias com tolerância de 24 h, conforme norma ABNT NBR 15259:2005.

Figura 8 – Avaliação da absorção por capilaridade



Fonte: Autora 2024

3.2.13 Avaliação do tempo de cura através do pulso ultrassônico

O ensaio de pulso ultrassônico foi utilizado para fins de comparação entre o traço de melhor desempenho mecânico e o traço padrão (referência), fazendo uma correlação entre a velocidade que a onda percorre o corpo de prova com a processo de cura. Para isso, foram realizadas as medições no estado fresco e endurecido. A medição da variação da VPU foi realizada utilizando o equipamento “*Pundit Lab*”, da *Proceq*, de acordo com a Figura 8. Este foi ligado ao computador e operado pelo *software Punditlink* também da *Proceq*. O *software* foi configurado para o transdutor, que opera com uma frequência de 54 MHz e largura de pulso de 9,3 μ s. Essas medições foram realizadas a cada um minuto nas primeiras 48 h após a moldagem, de forma automatizada, através da configuração do sistema operacional.

Figura 9 – Equipamento para determinação da VPU



Fonte: Autora (2024)

Para realização do ensaio de variação da Velocidade de Propagação do de Ultrassom (VPU) no corpo de prova (CP) no estado fresco, inicialmente foi aplicada, no interior da caixa acrílica, uma película de óleo mineral, visando facilitar o desmolde.

Em seguida, os transdutores do equipamento foram revestidos com um filme protetor e fixados nas laterais da caixa, em furos localizados em faces opostas, utilizou-se de algumas camadas de fita de teflon para garantir o ajuste adequado. Além disso, aplicou-se uma camada de vaselina na superfície de contato dos transdutores com o CP, facilitando o contato.

O molde foi preenchido em três camadas, realizando-se o adensamento com 25 golpes em cada uma delas. Por fim, a superfície foi nivelada e a caixa tampada para evitar perda de água por evaporação.

Após a execução do ensaio, os dados obtidos foram processados no software Microsoft® Excel 2019, realizando-se a correlação entre as horas de ensaio e a velocidade da propagação da onda.

3.3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.3.1 Área superficial (BET) do BC

A área de superfície, o volume total de poros e o diâmetro médio de poros das amostras de biochar estão apresentados na Tabela 5. O biochar com a maior área superficial foi o BC650, com 155,38 m². Dessa forma, tanto o BC450 quanto o BC650 apresentaram um aumento na área específica à medida que a temperatura elevou, o que pode ser atribuído à degradação térmica da matéria orgânica da biomassa em temperaturas mais altas, de acordo com Sahoo et al. (2021). Entretanto, esse comportamento de crescimento não se mantém na amostra BC750, que apresentou uma diminuição na área superficial em comparação com a amostra BC650, passando de 155,38 m²/g para 120,38 m²/g.

Quanto à análise de volume de poros nas amostras de BC, observou-se que não há presença de mesoporo nas amostras para as diferentes temperaturas. Em contrapartida, o material in natura apresentou 0,005 cm³/g de mesoporos. Para os volumes dos microporos, verificou-se que, à medida que a temperatura elevou, houve um aumento gradual na quantidade de microporos, passando de 0,0028 cm³/g a 450°C para 0,0283 cm³/g a 750°C.

Tabela 5 – BET das amostras

Fonte: Autora (2025)

Amostra	Área de superfície (m ² /g)	Volume de mesoporos BJH (cm ³ /g)	Diâmetro de mesoporos BJH (nm)	Volume dos microporos (< 2nm) T-plot (cm ³ /g)
NAT	1,41	0,005	33,00	0,0014
BC450	7,14	0,000	3,40	0,0028
BC650	155,38	0,000	3,41	0,0163
BC750	120,38	0,000	3,40	0,0283

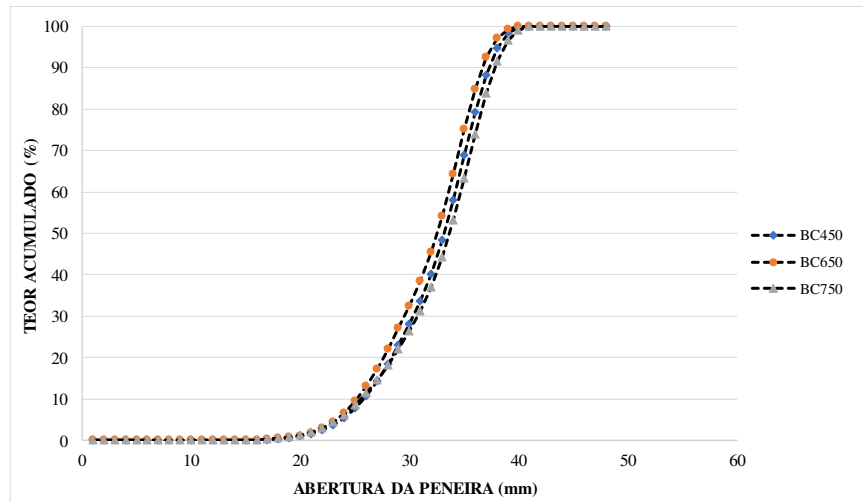
3.3.2 Granulometria à laser do BC após moagem

A granulometria à laser foi realizada nas amostras de biochar BC450, BC650 e BC750 após a moagem, com o objetivo de substituir a areia. Na Figura 10 apresentam-se as curvas granulométricas para as diferentes temperaturas de processamento. Com base nos dados obtidos, a média da granulometria da amostra BC450, Figura 10 (a) foi de 72,41 μm , e, ao analisar o percentual de material passante, verificou-se que 90% das partículas têm tamanho igual ou inferior a 156,6 μm . O residual dessa análise foi de 1,067%, indicando baixa variabilidade nos resultados e, portanto, alta confiabilidade, Figura 10 (b), a análise da amostra BC650 apresentou uma média de 62,46 μm , com 90% das partículas passantes apresentando tamanhos iguais ou abaixo de 135,9 μm , e um residual de 0,658%, o que também indica alta confiabilidade nos resultados, já que o residual indica a fração de partículas que, após a análise, não foram classificadas ou identificadas dentro dos limites de tamanho especificados. Por fim, a Figura 10 (c) mostra os dados para a amostra BC750, que apresentou uma média de 81,93 μm , com 90% das partículas passantes tendo tamanho igual ou inferior a 178,3 μm , e um residual de 0,839%.

Em resumo, as três amostras apresentam curvas granulométricas semelhantes. Sendo possível observar uma ligeira diferença nas médias na dimensão dos grãos de 90% ou menos. A amostra BC650 apresentou menor média e o menor tamanho de grãos passantes, enquanto BC750 obteve os maiores resultados em ambas as análises, já a BC450 ocupou a posição intermediária.

O D50 representa o diâmetro correspondente a 50% das amostras. Ao analisar as diferentes temperaturas, observou-se que, na Figura 10 (a), o valor para BC450 foi de 58,69 μm , enquanto na Figura 10 (b), para o BC650, foi de 50,32 μm . Por fim, o BC750 apresentou um valor de 66,12 μm , conforme Figura 10 (c).

Figura 10 – (a) Granulometria à laser para BC450. (b) Granulometria à laser para BC650. (c) Granulometria à laser para BC750.



Fonte: Autora (2025)

3.3.3 Determinação da massa específica do BC

De acordo com a Tabela 6, é possível observar que a medida que a temperatura de queima aumenta a massa específica também aumenta.

Tabela 6 – Massa específica do BC

Amostra	Massa específica (g/cm ³)
NAT	1,39
BC450	1,40
BC650	1,47
BC750	1,57

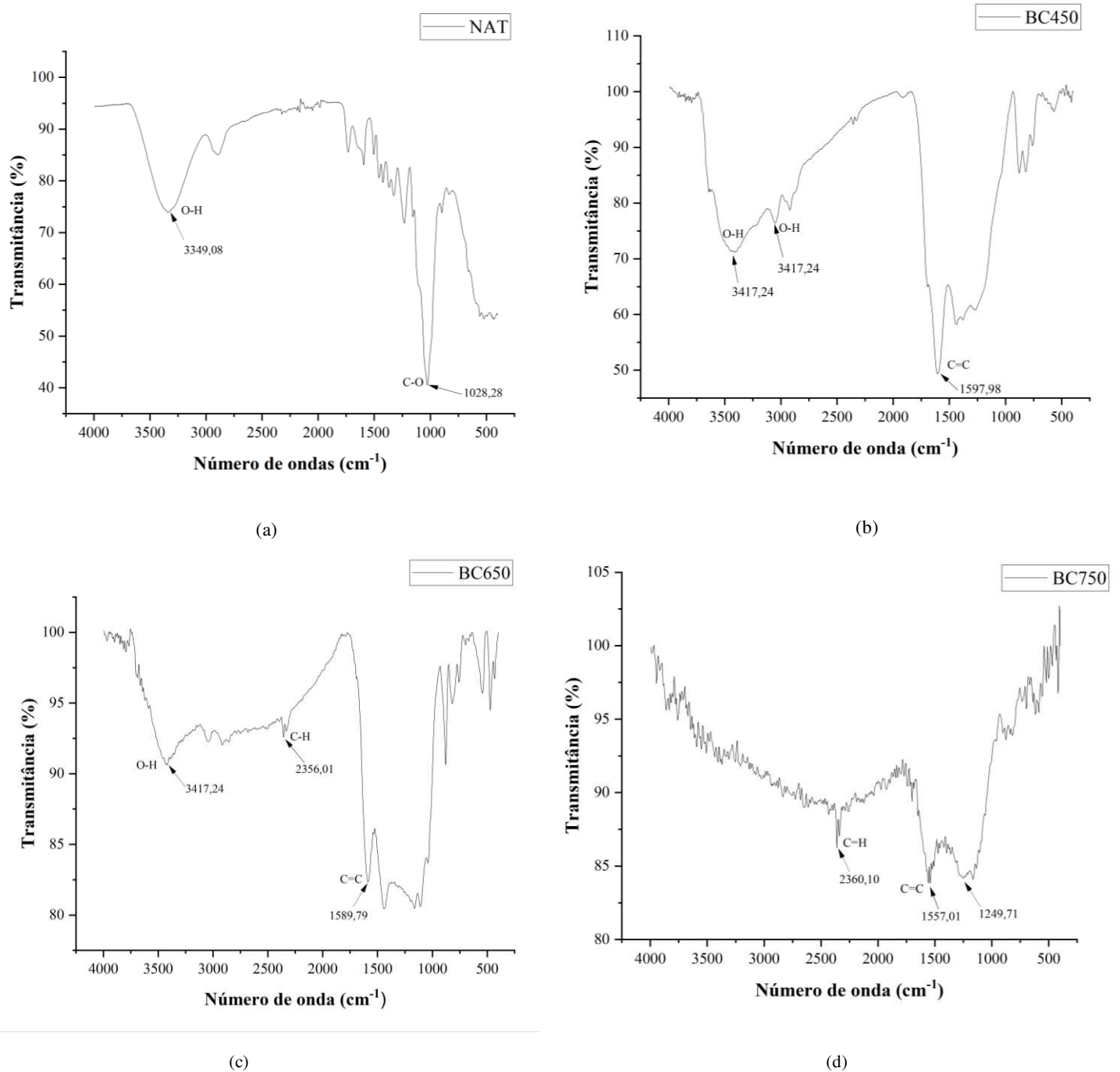
Fonte: Autora (2025)

3.3.4 Espectroscopia no infravermelho por transformada de Fourier (FTIR) das amostras de BC e NT

O FTIR foi realizado para as diferentes temperaturas de queima do BC, assim como em seu estado natural, anterior a queima. As bandas espectrais geradas pelas amostras de BC foram principalmente atribuídas devido à deformação de CH no grupo alifático. Além disso, na Figura 11 (a, b, c), observa-se um pico entre 3400-3600 cm⁻¹, referente ao alongamento de O-H em álcoois, ácido carboxílicos e moléculas de água. Além dos estiramentos de ligações O-H (associadas a grupos hidroxila e compostos fenólicos relacionados à lignina), também foram

identificados picos relacionados ao C-H (alifático) e C=C (aromático), indicando a presença de lignina.

Figura 11 – (a) Espectroscopia FTIR para NAT. (b) Espectroscopia FTIR para BC450. (c) Espectroscopia FTIR para BC650. (d) Espectroscopia FTIR para BC750.



Fonte: Autora (2025)

3.3.5 Pozolanicidade do BC

Na Tabela 7 apresentam-se os resultados para o ensaio de Chapelle para as 3 amostras de BC e para o material in natura NAT. Observa-se que a única amostra que apresentou atividade pozolânica foi o BC750, já que o valor mínimo estabelecido para verificação do material como pozolânico é de 436 mg Ca (OH)₂/g de adição de acordo com Hoppe filho et al., (2017).

A norma ABNT NBR 12653:2015 estabelece critérios químicos para que um material seja considerado pozolânico. De acordo com a norma, o somatório dos teores de dióxido de silício (SiO₂), óxido de alumínio (Al₂O₃) e óxido de ferro (Fe₂O₃) deve ser maior ou igual a cinquenta por cento (50%) para os materiais classificados na categoria “E”, referente àqueles que não foram contempladas nas classes N ou C. Além disso, o teor de trióxido de enxofre (SO₃) deve ser igual ou inferior a cinco por cento (5%). Nas condições avaliadas, o material atendeu a esses requisitos normativos.

Portanto, com base na metodologia de avaliação da atividade pozolânica preconizada pela ABNT NBR 5751:2015, as amostras com atividade pozolânica são classificadas como materiais passíveis de incorporação na composição de cimento Portland composto ou pozolânico.

Tabela 7 – Ensaio de Chapelle para verificação da pozolanicidade

Amostra	I_{Ca(OH)₂ PARA 50} ML	Resultado
NAT	116,69	Não pozolânico
BC450	118,97	Não pozolânico
BC650	27,66	Não pozolânico
BC750	848,59	Pozolânico

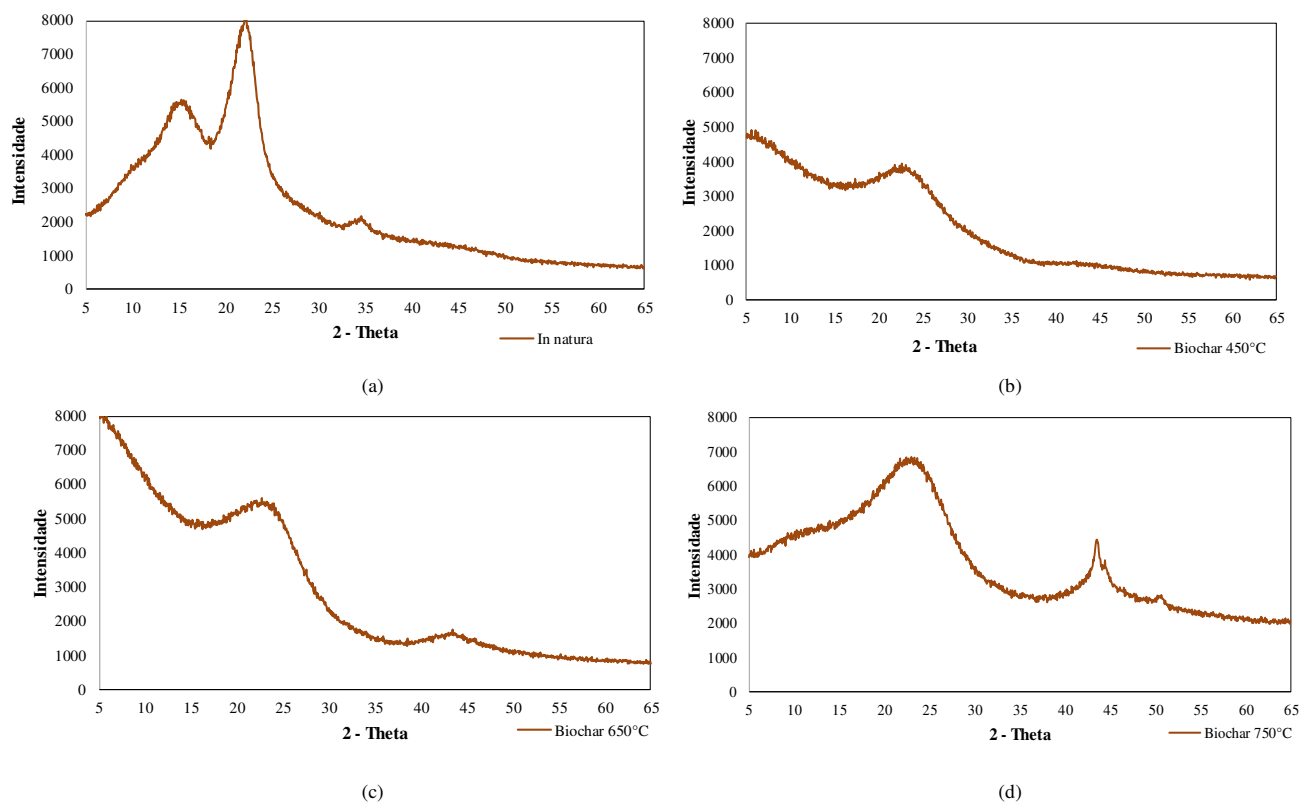
Fonte: Autora (2025)

3.3.6 Determinação química e mineralógica das amostras de BC e NAT

Os resultados da difração de raios X estão apresentados na Figura 12. Dois picos podem ser observados e distinguidos nos espectros da biomassa, Figura 11 (a), em $2\theta = 16^\circ$ e 22° , os quais

estão relacionados à celulose cristalina. Para os BC450, BC650 e BC750, apresentados na Figuras 12 (b, c, d), observa-se que a pirólise da biomassa resultou na perda dos picos de celulose e levou à formação de uma estrutura amorfa no BC produzido. O padrão DRX do BC exibe um pico de difração fraco e longo em aproximadamente $2\theta = 23,5^\circ$, o desenvolvimento da ordem atômica na estrutura do BC pode ser a explicação para esta observação (Gupta et al., 2020a).

Figura 12 – (a) Difratorômetro de Raios X da amostra NAT. (b) Difratorômetro de Raios X da amostra B450. (c) Difratorômetro de Raios X da amostra B650. (d) Difratorômetro de Raios X da amostra B750.



Fonte: Autora 2025

Na Tabela 8 apresentam-se os resultados de FRX das amostras de BC e NAT, nos quais os óxidos predominantes são o óxido de potássio, óxido de cálcio e o óxido de manganês. No estudo de Figueredo et al. (2017), também foi observada a uma forte presença de óxido de cálcio e óxido de manganês após a pirólise a 500°C.

Tabela 8 – FRX das amostras

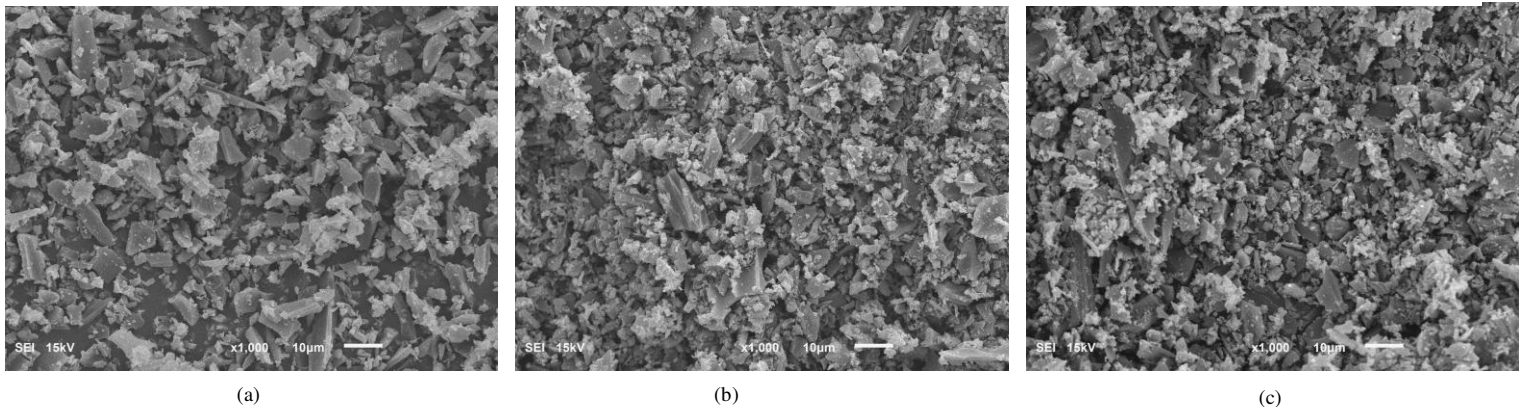
ID	K2O	SiO2	Fe2O3	SO3	Cr2O3	NiO	MnO	CaO	P2O5	MgO	Cl	TiO2
NAT	38,75	1,24	2,54	0,76	0,48	*	4,66	39,70	2,98	*	4,44	1,37
BC450	44,37	0,64	1,59	0,60	*	*	4,90	38,62	3,64	2,18	0,45	1,22
BC650	25,38	2,25	25,92	0,86	5,34	1,45	3,36	27,12	2,85	2,81	0,80	0,77
BC750	9,01	1,01	58,74	3,20	13,21	7,67	1,32	4,94	1,15	1,09	0,30	0,15

Fonte: Autora 2025

3.3.7 Determinação da morfologia do BC

Na Figura 13 apresenta-se a Microscopia de Varredura (1000x) realizada no material antes de ser incorporado à argamassa. A Figura 13 (a) corresponde à temperatura de queima de 450°C, a Figura 13 (b) à temperatura de 650°C e, finalmente, a Figura 13 (c) o MEV para a temperatura de 750°C. É possível observar semelhanças entre as três imagens. Uma das técnicas utilizadas na análise de amostras é a espectroscopia de energia dispersiva de raios-X (EDS), que examina a composição química em nível elementar das superfícies das partículas de forma localizada, de acordo com Noschang; Vieira (2021). A BC450 apresentou 85,29% de carbono e 14,71% de oxigênio, enquanto a amostra BC650 indicou a presença de 87,41% de carbono e 9,37% de oxigênio. Já a amostra BC750 mostrou 87,11% de carbono e 9,78% de oxigênio, alcançando resultados semelhantes encontrados por Júnior et al. (2022). De modo geral, em temperaturas mais baixas, o BC apresenta uma maior quantidade de funções oxigenadas em suas estruturas, enquanto que, sob temperaturas altas, a razão O/C é menor devido à composição térmica destes grupos (NOVOTNY et al., 2015)

Figura 13 – (a) MEV amostra BC450. (b) MEV amostra BC650. (c) MEV amostra BC750.



Fonte: Autora (2025)

3.3.8 Propriedades físicas no estado fresco da argamassa de BC

Na Tabela 9 apresentam-se as características físicas da argamassa em seu estado fresco, incluindo massa específica, índice de consistência e retenção de água. No processo de produção da argamassa com a incorporação do BC, o índice de consistência foi fixado com base na argamassa de referência, estabelecendo como parâmetro o valor de $270 \pm 5 \mu\text{m}$. Para alcançar esse índice de consistência pré-determinado, foram adicionadas diferentes proporções de água.

Assim, observe-se que a massa específica aumenta para uma mesma faixa de substituição, ou seja, à medida que aumenta a temperatura a massa específica também se eleva. Entretanto, ao comparar a massa específica entre as faixas de substituição de 10 e 20%, verifica-se uma diminuição, observada em todas as temperaturas de queima. Isso ocorre devido ao aumento da substituição da areia por BC, que é mais leve que a areia. Já a retenção de água das argamassas com incorporação de BC foi superior à amostra de referência (REF).

Tabela 9 – Propriedades físicas das argamassas com incorporação de BC e REF

Amostra	Índice de consistência	Massa específica (kg/m ³)	Retenção de água (%)
REF	273	1833,24	99,97
10BC450	267	1656,06	99,98
10BC650	273	1696,91	99,98
10BC750	270	1747,75	99,98
20BC450	269	1484,92	99,99
20BC650	272	1513,59	99,98
20BC750	269	1685,90	99,99

Fonte: Autora (2025)

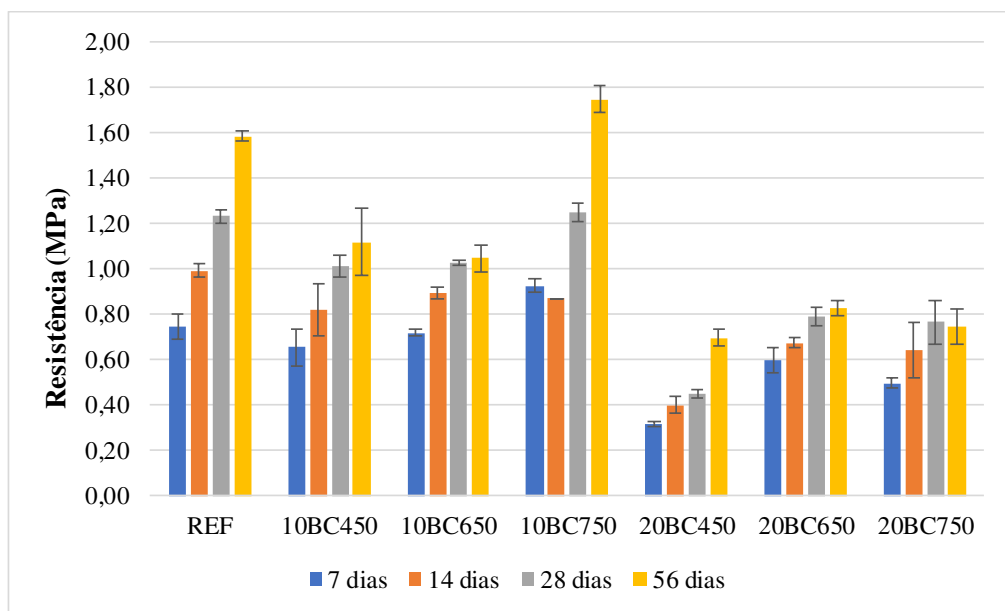
3.3.9 Efeitos na resistência à compressão

Na Figura 14 apresenta o desempenho mecânico à compressão. Ao analisar os resultados, observa-se que resistência média das argamassas com 10% de substituição de areia por biochar foi 40% superior à da argamassa com 20% de substituição. Essa redução observada com o aumento do teor de substituição, pode estar relacionado à natureza porosa do BC. Devido ao alto teor de porosidade de suas partículas, o biochar pode atuar como um agente de cura interna da matriz cimentícia. Esse mecanismo favorece a formação de um maior volume de produtos de hidratação (MALJAE et al., 2021), contribuindo para mitigar a perda de resistência mecânica.

A análise da resistência à compressão aos 28 e 56 dias mostra que a amostra 10BC750 apresentou a melhor resistência, superando a resistência da argamassa REF aos 56 dias. Além disso, na avaliação estatística entre as amostras, observou-se uma diferença significativa entre as idades de 28 e 56 dias, pois o valor de F da Anova foi 7,24, enquanto o F crítico foi 3,86. O valor de P também foi inferior a 5%, o que confirma a diferença significativa entre os tratamentos. De acordo com o teste de Tukey, observou-se que alguns tratamentos não possuem diferenças significativas, sendo eles 10BC450 e REF, 10BC650 e 10BC450, 10BC450 e 10BC750, 20BC750 e 20BC650 e entre as amostras 20BC450 e 20BC750.

Por outro lado, para substituições superiores a 20%, como as de 25 e 50% de areia por agregados de casca de pêssigo causou uma queda de 16 e 25% na resistência à compressão da argamassa de cimento (WU et al., 2020). Além disso, outro fator que influencia no desempenho mecânico foi observado em estudos conduzidos por Panesar; Shindman (2012), onde os agregados de cortiça em diferentes tamanhos de partículas foram utilizados. Com o aumento do tamanho de partícula dos agregados substituídos, observou-se uma maior redução na resistência à compressão dos compósitos de cimento.

Figura 14 – Resistência à compressão

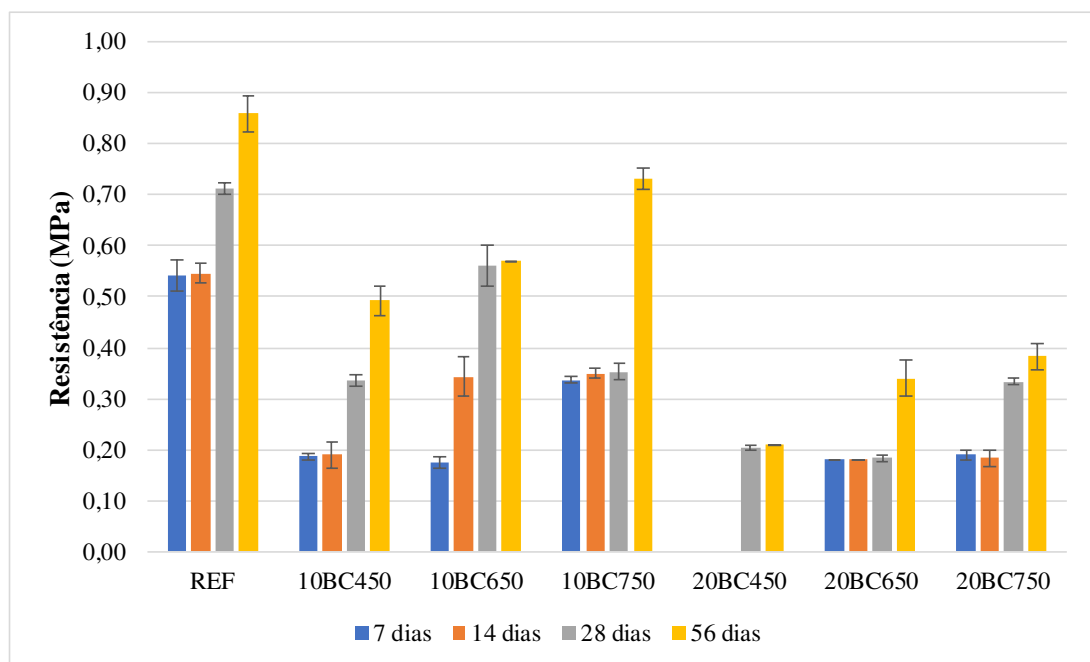


Fonte: Autora (2025)

3.3.10 Efeitos na resistência à tração na flexão

Na Figura 15 apresenta-se a resistência à tração na flexão. Aos 28 dias, a amostra que obteve melhor desempenho foi a 10BC650. No entanto, aos 56 dias, a amostra 10BC750 demonstrou um maior ganho de resistência. Apesar desse ganho, a resistência mecânica da amostra 10BC750 ainda foi inferior à da amostra de referência (REF). As amostras para 7 e 14 dias para a argamassa 20BC450, apresentaram resistência mecânica à tração na flexão iguais a zero. Na avaliação estatística entre as amostras, observou-se uma diferença significativa entre as idades de 28 e 56 dias, pois o valor de F da Anova foi 5,13, enquanto o F crítico foi 3,86. O valor de P também foi inferior a 5%, o que confirma a diferença significativa entre os tratamentos. De acordo com o teste de Tukey, observou-se que alguns tratamentos não possuem diferenças significativas, sendo eles 10BC450 e 10BC650, 10BC750 e REF, 20BC450 e 20BC650, 20BC650 e 10BC450, 20BC750 e 10BC750 e entre as amostras 20BC650 e 20BC750.

Figura 15 – Resistência à tração na flexão

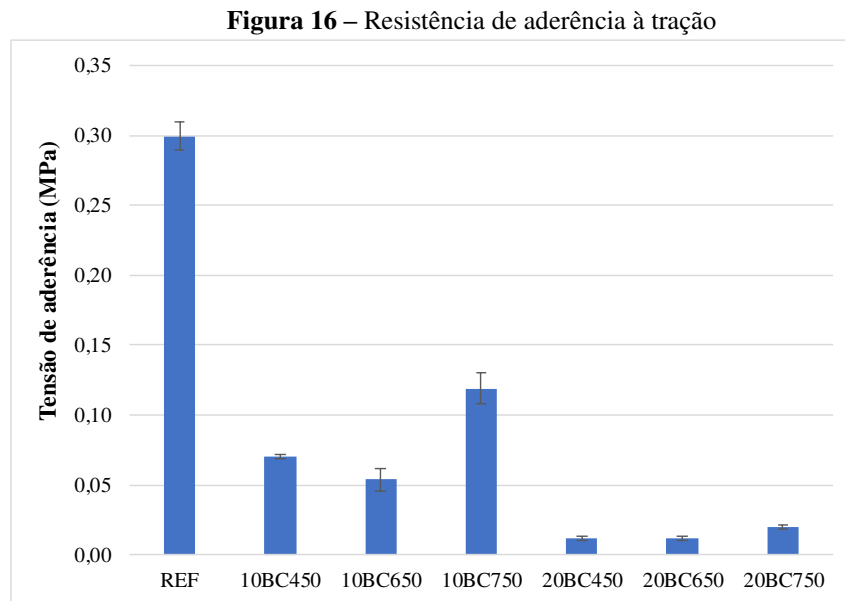


Fonte: Autora (2025)

3.3.11 Resistência de aderência à tração NBR 13528:2019

A resistência de aderência à tração foi avaliada para todas as incorporações de BC e para a argamassa REF. As amostras de BC que apresentaram maiores resistências foram 10BC450 e 10BC750. Entretanto, embora se destacassem em comparação com às demais incorporações, a

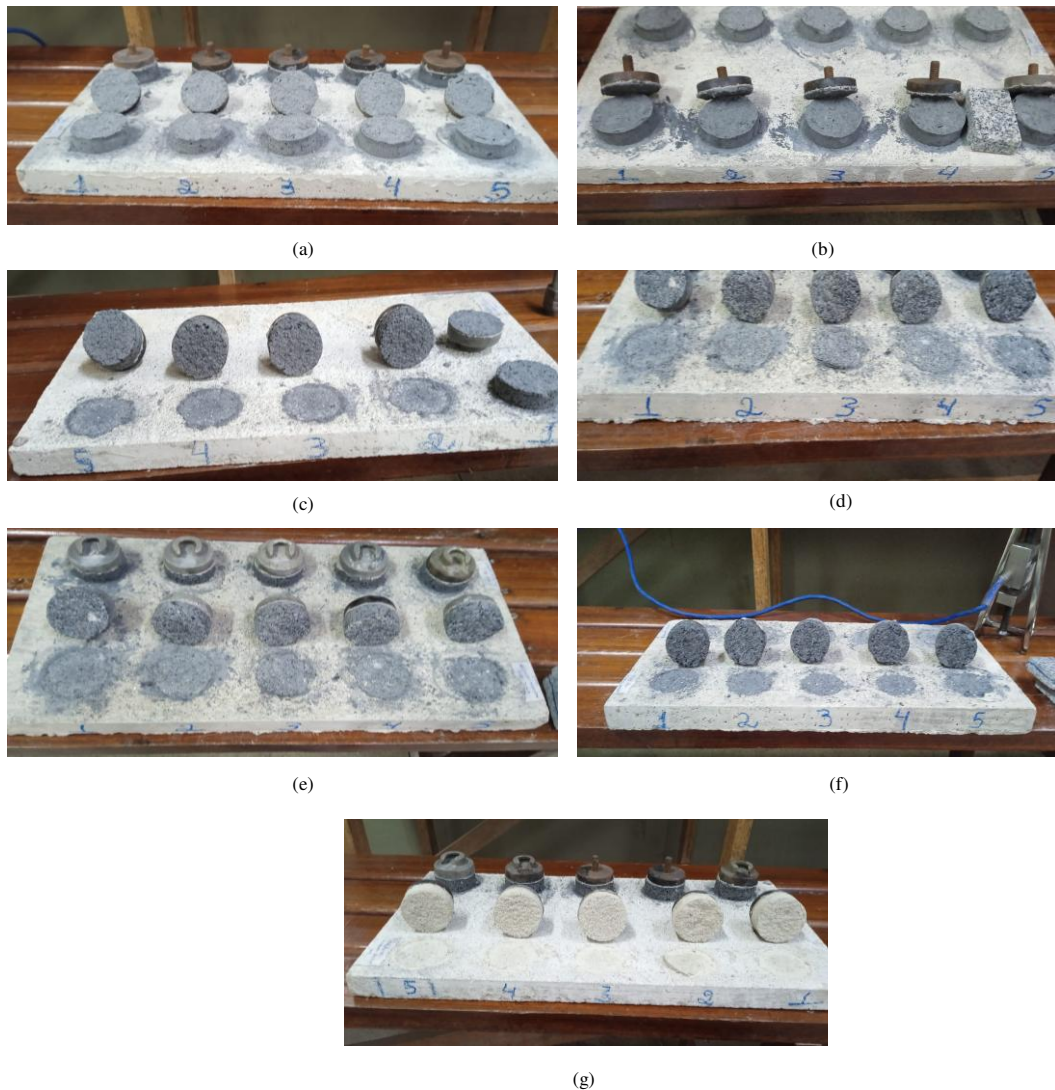
argamassa de REF apresentou uma resistência duas vezes superior à dessas amostras, conforme mostra a Figura 16.



Fonte: Autora (2025)

Além disso, foi realizada a avaliação do tipo de ruptura conforme a NBR (ABNT, 2019). As possíveis formas de ruptura no ensaio de resistência à tração, para um sistema sem chapisco, incluem: ruptura no substrato, ruptura na interface entre o substrato e a argamassa, ruptura na argamassa, ruptura na interface entre a argamassa e a cola e a ruptura na interface entre a cola e a pastilha, sendo o substrato a base sobre a qual a argamassa foi aplicada. As amostras 10BC450 e 10BC650 apresentaram ruptura na interface entre a argamassa e a cola. Já para as demais amostras (REF, 10BC750, 20BC450, 20BC650 e 20BC750), a ruptura ocorreu na interface entre o substrato e a argamassa, conforme ilustrado na Figura 17.

Figura 17 – Resistência de aderência à tração (a) Amostra 10BC450. (b) Amostra 10BC650. (c) Amostra 10BC750. (d) Amostra 20BC450. (e) Amostra 20BC650. (f) Amostra 20BC750. (g) Amostra REF.



Fonte: Autora (2025)

3.3.12 Absorção por capilaridade nos CP's

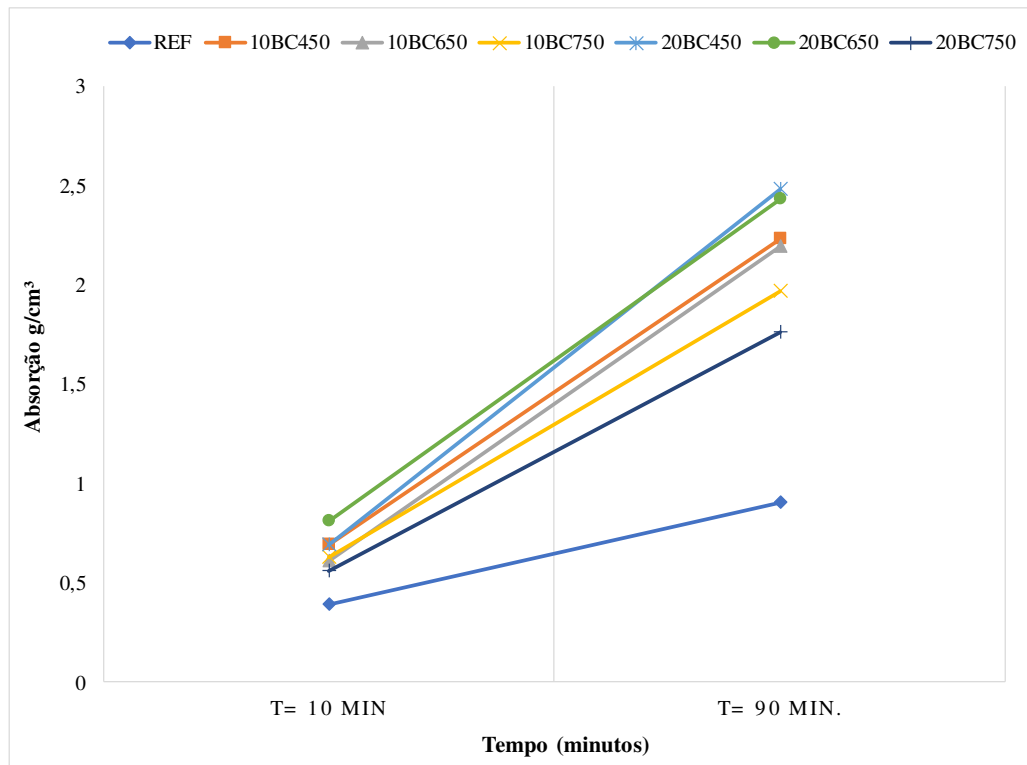
Foi realizada a análise de absorção por capilaridade nos corpos de prova, avaliando os tempos de 10 e 90 minutos. A argamassa que apresentou menor absorção aos 10 minutos foi 10BC650, enquanto a maior aos 10 minutos foi observada na amostra 20BC650. Aos 90 minutos, o corpo de prova que apresentou menor absorção foi 20BC750, e a maior absorção foi registrada para a amostra 20BC450. Os dados estão apresentados na Tabela 10, e o crescimento da absorção para cada tratamento é mostrado na Figura 18.

Absorção de água é um fator de grande importância, uma vez que impacta diretamente na durabilidade da argamassa. Quanto maior a porosidade da amostra, maior a quantidade de água que pode ser absorvida. Experimentos mostraram que a absorção de água aumentou linearmente com a taxa de substituição de agregados leves. Um aumento de 25, 42 e 60% foi observado na absorção de água com 25, 45 e 60% de substituição de areia grossa, respectivamente. Esse aumento da absorção de água da argamassa é atribuído à porosidade muito maior do biochar em comparação com a areia, proporcionando maior espaço poroso disponível para absorção de água (MARTÍNEZ-GARCÍA et al. 2017). Estudos com resultados semelhantes foram observados por Torkittikul et al. (2017), onde uma cinza de fundo de carvão foi usada para substituir total ou parcialmente a areia.

Tabela 10 – Absorção por capilaridade

Argamassa	Absorção g/cm ³	
	T= 10 min	T= 90 min.
REF	0,39	0,9
10BC450	0,69	2,23
10BC650	0,61	2,19
10BC750	0,63	1,97
20BC450	0,69	2,48
20BC650	0,81	2,43
20BC750	0,56	1,76

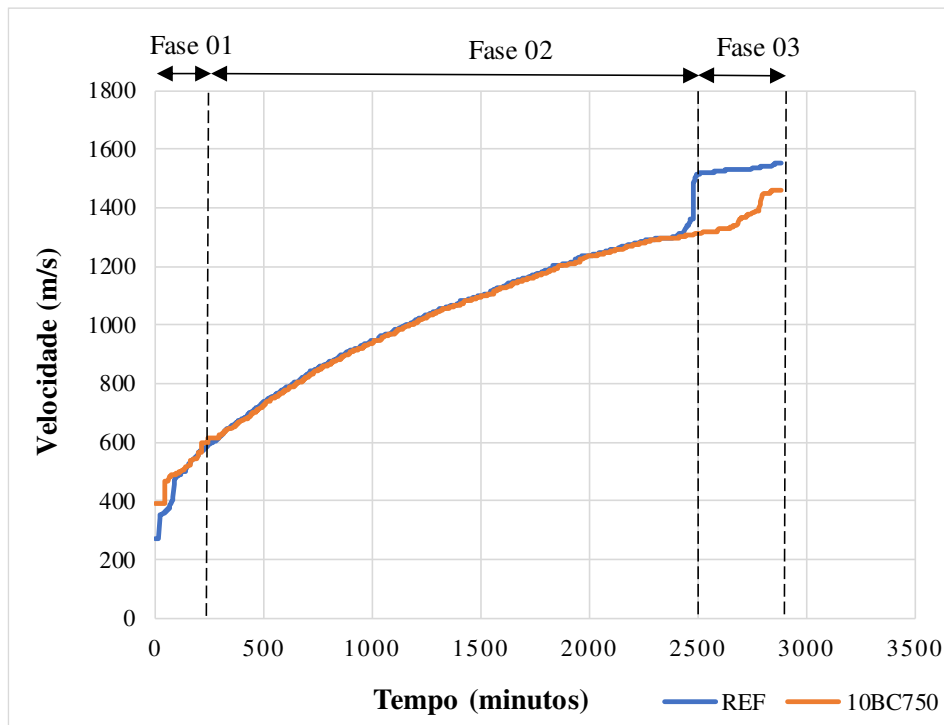
Fonte: Autora (2025)

Figura 18 – Crescimento da absorção por capilaridade para 10 e 90 minutos

Fonte: Autora (2025)

3.3.13 Determinação da curva de cura pelo método VPU

Pelo método utilizado, observa-se um período em que a VPU é baixa e há pouca variação (fase 1), indicando pouca hidratação. Em seguida, ocorre um aumento (fase 2), o que sugere uma elevação da taxa de hidratação para ambos traços de argamassa. Entretanto, na fase 3, verifica-se uma taxa de hidratação crescente, dando continuidade ao processo de hidratação para a argamassa 10BC750, enquanto a velocidade para a argamassa de referência (REF) exibiu uma curva menos acentuada, indicando que o processo de hidratação começou a estabilizar, indicando uma estabilização da hidratação, conforme Figura 19.

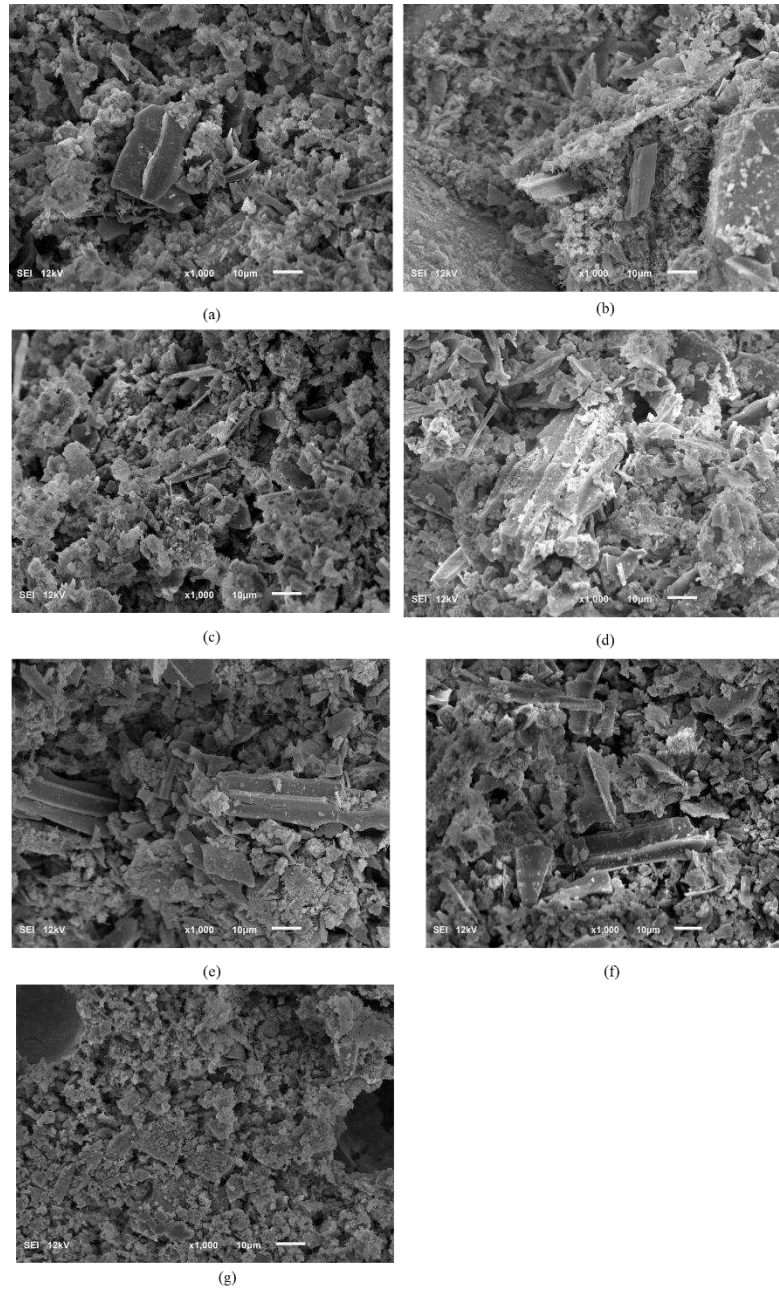
Figura 19 – Variação da VPU média no estado fresco

Fonte: Autora (2025)

3.3.14 Determinação da Microscopia de Varredura dos CP's

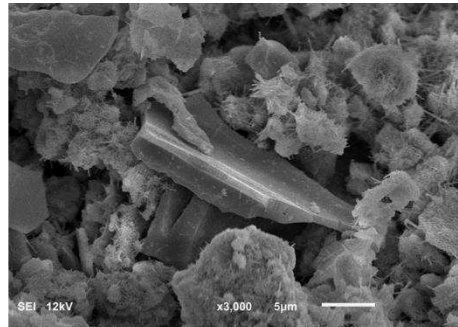
Nas Figuras 20 e 21 apresentam-se o MEV dos corpos de prova (CP's) rompidos aos 28 dias para todas as substituições de areia por BC (10B450, 10B650, 10B750, 20B450, 20B650, 20B750) e a amostra REF. A Figura 20 apresenta o MEV 1000x, onde é possível observar estruturas alongadas em toda a amostra contendo biochar. Essas estruturas, semelhantes a cristas e células, originam-se da estrutura capilar da matéria-prima de biomassa. Poros podem ser identificados nessas estruturas, formados pela liberação de voláteis e compostos orgânicos durante o processo de pirólise (PRANEETH et al., 2020). As partículas alongadas conferiram ao biochar um efeito de interligação na matriz de cimento, como é possível observar na Figura 20.

Figura 20 – (a) MEV X1000 no CP 10B450. (b) MEV 1000x no CP 10B650. (c) MEV 1000x no CP 10B750. (d) MEV 1000x no CP 20B450. (e) MEV 1000x no CP 20B650. (f) MEV 1000x no CP 20B750. (g) MEV 1000x no CP REF.

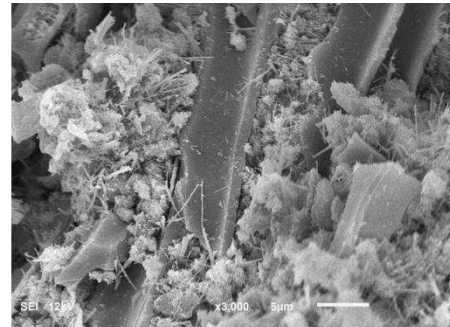


Fonte: Autora (2025)

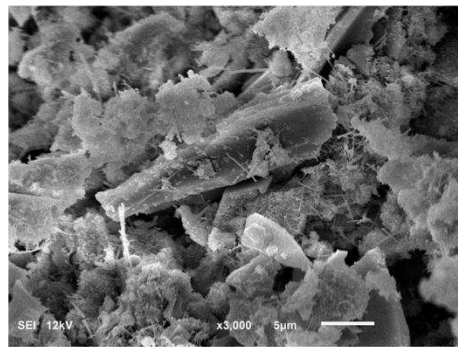
Figura 21 – (a) MEV 3000x no CP 10B450. (b) MEV 3000x no CP 10B650. (c) MEV 3000x no CP 10B750. (d) MEV 3000x no CP 20B450. (e) MEV 3000x no CP 20B650. (f) MEV 3000x no CP 20B750. (g) MEV 3000x no CP REF.



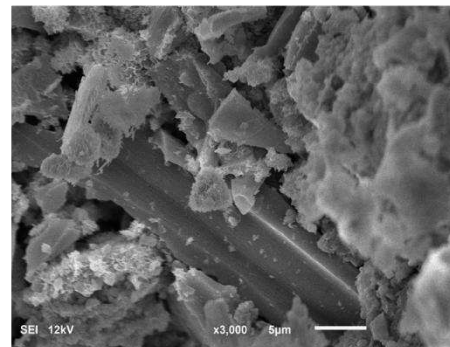
(a)



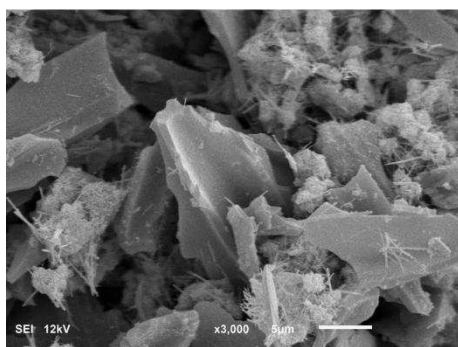
(b)



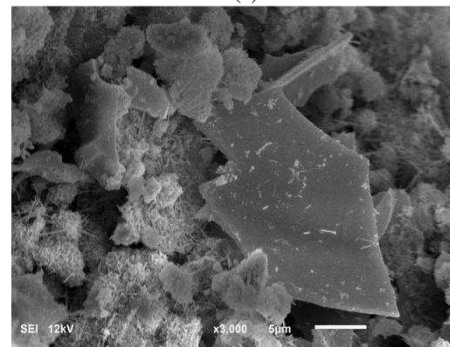
(c)



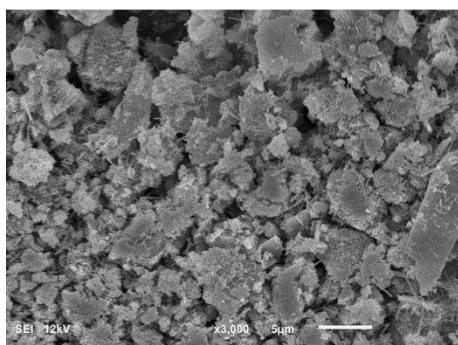
(d)



(e)



(f)



(g)

Fonte: Autora (2025)

4 ANÁLISE DA SUBSTITUIÇÃO DO CIMENTO POR BIOCHAR, COM ÊNFASE NO DESEMPENHO MECÂNICO E NA AVALIAÇÃO DA ECOEFICIÊNCIA

4.1 INTRODUÇÃO

O cimento é um componente básico do concreto, sendo considerado um dos materiais de construção mais utilizados (GUO et al., 2023). Em 2022, a produção mundial de cimento foi cerca de 4,2 bilhões de toneladas, se destacando como principais produtores os países Índia e China (GARSIDE, 2022). Dessa forma, o principal desafio enfrentado pela indústria cimenteira atualmente é a redução das emissões de CO₂. O cimento é responsável por 8% das emissões globais de CO₂, segundo a Agência Internacional de Energia (2023). Afim que alcançar a meta fixada pela ONU, emissões zero até 2050, são necessárias reduções anuais de 4% até o ano de 2030 na indústria cimenteira.

Dessa forma, a imobilização do carbono dentro do material seria uma maneira de reduzir a emissão líquida de CO₂, tendo por objetivo não comprometer as outras propriedades dos compósitos cimentícios. O biochar se apresenta como uma solução viável, uma vez que se caracteriza por ser um material carbonáceo poroso, sendo uma solução sustentável visando mitigar as emissões de CO₂ reduzindo a produção de cimento, além de promover a reciclagem de biomassa residual (CARMI; KRONFELD; MOINESTER, 2019; GUPTA et al., 2021b; GUPTA; KUA; LOW, 2018c).

De acordo com estudos realizados por Akhtar; Sarmah (2018); Asadi Zeidabadi et al. (2018); Choi; Yun; Lee (2012); Gupta; Kua; Pang (2018), as partículas finas do biochar podem induzir o efeito de enchimento e cura interna, melhorando a estanqueidade de materiais cimentícios através da ação de bloqueio de poros e densificação. Além disso, de acordo com Ahmad et al. (2015) afirmaram que a adição de 0,08% em peso de partículas de bambu carbonizadas inertes aumenta a resistência à flexão em 66% e a tenacidade em 103 % dos compósitos cimentícios.

Entretanto, alguns fatores podem afetar diretamente as propriedades dos compósitos do biochar tais como condições de preparo do biochar bem como o tipo de biomassa utilizadas. Nos estudos de Tan et al. (2020), para a análise do biochar derivado da biomassa de resíduos proveniente de madeira, em quatro temperaturas de pirólise (400°C, 500°C, 600° e 700°C), chegaram à conclusão que a adição de Biochar não melhora significativamente a resistência à flexão, o que

é atribuído ao baixo módulo de elasticidade das partículas. Já as argamassas contendo Biochar pirolisadas em temperatura relativamente mais baixa (400°C e 500°C) apresentaram melhor resistência à compressão quando comparados a temperaturas superiores (600°C e 700°C), para uma mesma porcentagem de substituição do cimento por biochar.

De acordo com Tan et al. (2020), em um estudo realizado com argamassas utilizando biochar submetido a diferentes temperaturas de queima (450, 500, 600 e 750°C) e a substituições em peso do cimento (0, 1, 3, 5 e 10%), com resíduo de madeira como biomassa, os resultados indicaram que a adição de biochar não melhora significativamente a resistência à flexão, o que foi atribuído ao baixo módulo de elasticidade das partículas. Por outro lado, as argamassas contendo biochar pirolisado a temperaturas relativamente mais baixas apresentaram melhor resistência à compressão.

No entanto, na pesquisa de Park et al. (2021a), utilizando biomassa de origem de madeira, a uma temperatura de 700°C, e substituindo o cimento nas proporções de 2%, 4%, 6% e 8%, foram obtidos resultados promissores. Observou-se que a incorporação de biocarvão na argamassa não somente melhorou a resistência, mas também aprimorou as propriedades higrotérmicas da mistura.

Liu; Li; Xu (2022), realizaram uma investigação sobre a utilização de biochar de bambu em argamassa de cimento como biomodificador, com o objetivo de melhorar a resistência à compressão e a capacidade de fratura, especialmente em relação à resistência a fissuras. Para isso, utilizaram o biochar nas temperaturas de 650°C e 750°C, adotando teores de substituição de 0,2%, 0,4%, 1%, 2%, 3% e 4% em peso de cimento. Os resultados mostraram que a resistência à compressão das argamassas com biochar foi superior à da argamassa de controle. O efeito positivo do biochar de bambu na resistência à compressão e na tenacidade à fratura da argamassa foi atribuído aos seus efeitos de preenchimento e autocura na matriz de cimento, além de possivelmente estar envolvido na reação de hidratação.

Assim, apesar de emergente, o biochar é uma alternativa com grande potencial, podendo ser adicionado à matriz cimentícia, pois apresenta características significativas, como alta estabilidade, excelente capacidade de absorção de água, baixo custo, baixa condutividade térmica, baixa inflamabilidade e boa estabilidade química em materiais cimentícios (GUPTA et al., 2020b; GUPTA; KUA; PANG, 2018b; LIU; LI; XU, 2022c; PARK et al., 2021). Essas propriedades ajudam a melhorar a resistência e a sustentabilidade dos compósitos de cimento.

Contudo, o objetivo deste estudo avaliar uma argamassa ecoeficiente com a adição de biochar em substituição parcial ao cimento e definir um ótimo de substituição, que consiste nas avaliações da resistência através do desempenho mecânico do cimento, e emissões de CO₂eq. Assim, buscou-se obter a proporção de substituição que maximize o desempenho mecânico, e minimize a emissão de CO₂eq.

4.2 MATERIAIS E MÉTODOS

O estudo foi desenvolvido em três etapas principais: a primeira consistiu na caracterização do biochar, a segundo na análise da resistência mecânica à compressão, e a terceira, na análise da ecoeficiência para os teores substituídos.

4.2.1 Processo de moagem do material

Após a conclusão do processo de produção do biochar (BC), a amostra foi submetida ao processo de moagem através do moinho epicíclico FRITSCH Pulverisette 6, conforme ilustrado na Figura 22. A moagem foi realizada até que 100% do material passasse pela peneira com malha de abertura #200. Para isso, o equipamento foi programado para operar a 350 rpm, realizando três ciclos de 5 minutos cada, utilizando 75% da potência do reservatório.

Figura 22 – (a) Amostra de BC após passar pela moagem. (b) Equipamento moinho de autoeficiência.



(a)

(b)

Fonte: Autora (2025)

4.2.1 Caracterização do material

Os procedimentos utilizados para a análise química imediata basearam-se na norma ASTM – D1762 – 84 (2021), utilizando o biochar moído que passou na peneira de 40 mesh e ficou recolhido na de 60 mesh. Todas as amostras foram avaliadas em duplicata, resultando na determinação dos teores de cinzas, matérias voláteis e carbono fixo. Dessa forma, o biochar de eucalipto a temperatura de 750°C apresentou 5,5% de voláteis, 1,405% de cinzas e 93,05% de carbono fixo. Para a biomassa, antes da queima, tem-se que 84,2% de voláteis, 0,217% de cinzas e 15,54% de carbono fixo.

A área superficial específica e o volume de poros do biochar moídos foram determinados empregando adsorção multiponto usando o método Brunauer-Emmett-Teller (BET), através do equipamento Nova 600 BET (Anton Paar) - Analisador de área superficial e volume de poros. Amostras de biochar, cerca de 0,15 g, foram desgaseificadas por 8 h a 105°C, antes do BET. O método t-Plot foi usado para determinar a área superficial do microporo (considerando que microporos são menores que 2 nanômetros), enquanto para determinar o volume dos mesoporos foi utilizado a teoria de Barrett-Joyner-Halenda (BJH).

A granulometria à laser foi realizada através do equipamento Granulômetro à laser Bettersize 2000, na Universidade Federal de Ouro Preto (UFOP). Para a determinações das massas específicas para as amostras BC750 e da biomassa (NAT) seguiu-se a norma NBR 16605:2017, que estabelece o método de ensaio para determinação da massa específica do cimento, no laboratório de materiais da Universidade Federal de Viçosa (UFV). E a análise do espectro infravermelho com Transformada de Fourier (FTIR) foi realizado no laboratório de Nanomateriais e Química Ambiental LaNaQua da Universidade Federal de Viçosa (UFV).

A determinar o índice de pozonalidade das amostras de BC foi através do método Chapelle conforme a norma ABNT NBR 15895:2010. O ensaio consiste em manter em agitação uma mistura de um grama de adição mineral e dois gramas de óxido de cálcio (CaO) em 250 ml de água, acondicionada em um Erlenmeyer polimérico, por um período de 16 ± 2 horas, à uma temperatura de (90 ± 5) °C. O resultado é expresso através da quantidade de hidróxido de cálcio fixado por grama de adição mineral.

As análises microscópicas foram realizadas na amostra BC750 e na biomassa (NAT). As imagens das amostras de BC foram obtidas por meio do Microscópio Eletrônico de Varredura

- JEOL - JSM-6010LA do Laboratório de Microscopia Eletrônica de Varredura – Departamento de Física (DPF) da UFV.

4.2.2 Avaliação da ecoeficiência

O objetivo da avaliação da ecoeficiência neste estudo é avaliar o impacto ambiental do uso de biochar (BC) derivado da biomassa de eucalipto, produzido a partir da pirólise na temperatura de 750° na avaliação da resistência à compressão da matriz cimentícia. A quantidade de material adotado para o cenário foi de 1 tonelada, e a unidade adotada foi kg de emissão de CO₂ eq. Para a avaliação da ecoeficiência foi utilizada a norma da ABNT NBR ISO 14045:2014. Além disso, utilizou-se o software SimaPro versão 9.5 e o banco de dados Ecoinvent versão 3.9.1, a fim de obter a contribuição do cimento CP-V nas emissões de CO₂eq para a categoria de impacto referente ao aquecimento global.

As emissões de gases de efeito estufa para a atmosfera estão relacionadas às alterações climáticas. O Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas (IPCC) desenvolveu um modelo que caracteriza os fatores de emissões, e é expresso como Potencial de Aquecimento Global para horizonte temporal 100 anos, em kg dióxido de carbono/kg emissão (PRÉ SUSTAINABILITY, 2023).

Os dados para emissão de kg de CO₂ eq para o cimento CP V estão descritos na Tabela 11, esses dados referem-se ao cimento produzido no Brasil e a emissão equivalente para produzir 1 Kg desse material.

Tabela 11 – Kg de CO₂ eq para produção de 1 kg de cimento CPV

Material	Kg de CO ₂ eq
Cement, CP V RS {BR} cement production, CP V RS Cut-off, U	0,742

Fonte: Autora (2025)

Assim, neste estudo, o LCA para o cimento foi realizado usando o software *SimaPro* com o método de avaliação ReCiPe 2016 Hierarchy. O método ReCiPe 2016 Hierarchy com indicadores de ponto médio é aplicado para avaliar a avaliação de impacto do ciclo de vida (LCA).

4.2.3 Produção e desempenho mecânico das misturas

Para a análise da resistência mecânica da matriz cimentícia, foram utilizados o cimento Portland CP V e a areia normal, de acordo com a norma ABNT NBR 7215:2019. As amostras de argamassa para a resistência mecânica do cimento foram produzidas com base nas proporções de acordo com a Tabela 12. A ordem de mistura dos componentes seguiu o estabelecido em norma.

Tabela 12 – Composição da argamassa em massa (kg)

Amostra	Cimento (kg)	BC (Kg)	Areia grossa #16 (Kg)	Areia média grossa #30 (Kg)	Areia média fina #50 (Kg)	Areia fina #100 (Kg)	Água (l)
REF	0.624	0.000	0.468	0.468	0.468	0.468	0.300
BC5	0.593	0.031	0.468	0.468	0.468	0.468	0.300
BC10	0.562	0.062	0.468	0.468	0.468	0.468	0.300
BC15	0.531	0.093	0.468	0.468	0.468	0.468	0.300

Fonte: Autora (2025)

Para determinação do desempenho mecânico foram moldados corpos de prova cilíndricos com 50 mm de diâmetro e 100 mm de altura, após 24 horas estes foram desmoldados e submetidos à cura úmida com temperatura controlada de 25°C, conforme a Figura 24 (a). O ensaio de resistência à compressão conforme Figura 24 (b), foi realizado de acordo com o estabelecido pela ABNT NBR 7215:2019, através da máquina universal de ensaio ilustrada na Figura 24 (c).

Figura 23 – Preparação e desempenho mecânico das amostras: (a) Cura úmida em câmara com temperatura controlada. (b) compressão simples. (c) prensa hidráulica/elétrica utilizada no ensaio de resistência à compressão.



(a)



(b)



(c)

Fonte: Autora (2025)

4.3 Resultados e discussões

4.3.1 Caracterização do material

A área de superfície, o volume total de poros e o diâmetro médio de poros das amostras de biochar estão apresentados na Tabela 13. São apresentados os resultados indicando um aumento da área superficial após a queima, bem como aumento de microporos.

Tabela 13 – BET das amostras

Amostra	Área de superfície (m²/g)	Volume de mesoporos (cm³/g)	Diâmetro de mesoporos BJH (nm)	Volume de microporos (<2nm) T-plot (cm³/g)
NAT	1,41	0,005	33	0,0014
BC750	120,38	0	3,4	0,0283

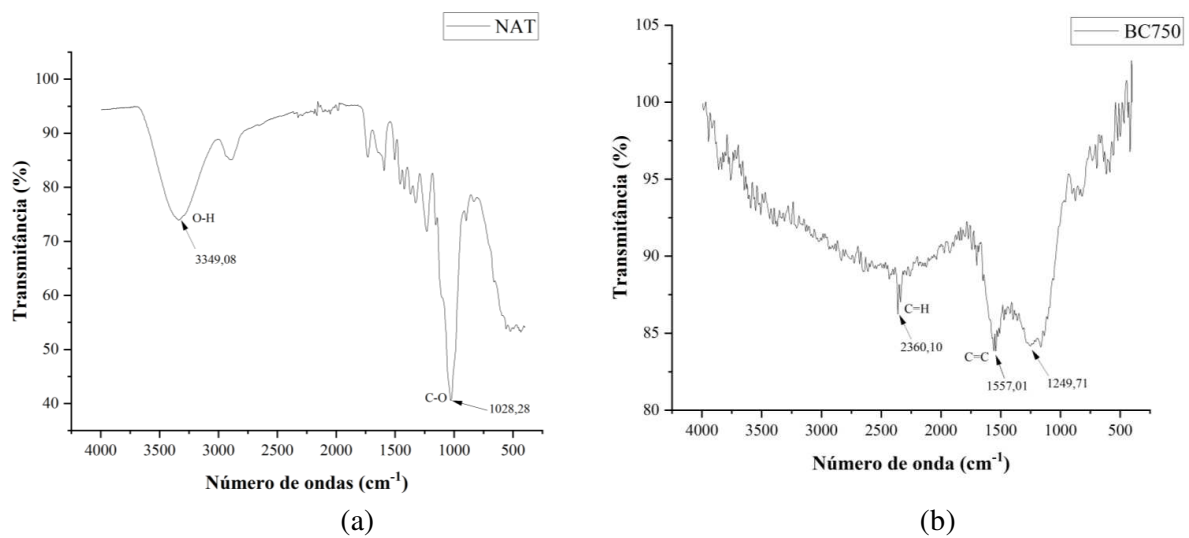
Fonte: Autora (2025)

Os resultados da granulometria à laser para a amostra de biochar BC750, apresentou uma média de 81,93 μm , com 90% das partículas passantes tendo tamanho igual ou inferior a 178,3 μm , e um residual de 0,839%. Para o D50 indica que para a amostra BC750 amostrou um valor de 66,12 μm .

A massa específica para a amostra BC750 foi de 1,57 g/cm³ e para a amostra NAT 1,39 g/cm³, observou-se um aumento da massa específica quando se compara a amostra antes e posteriormente a queima.

As bandas espectrais geradas pelas amostras de BC foram principalmente atribuídas à deformação de CH no grupo alifático. Além disso, na Figura 25 (a, b), observa-se um pico entre 3400-3600 cm⁻¹, referente ao alongamento de O-H em álcoois, ácido carboxílicos e moléculas de água. Além dos estiramentos de ligações O-H (associadas a grupos hidroxila e compostos fenólicos relacionados à lignina), também foram identificados picos relacionados ao C-H (alifático) e C=C (aromático), indicando a presença de lignina.

Figura 24 – (a) Espectroscopia FTIR para NAT. (b) Espectroscopia FTIR para BC750.

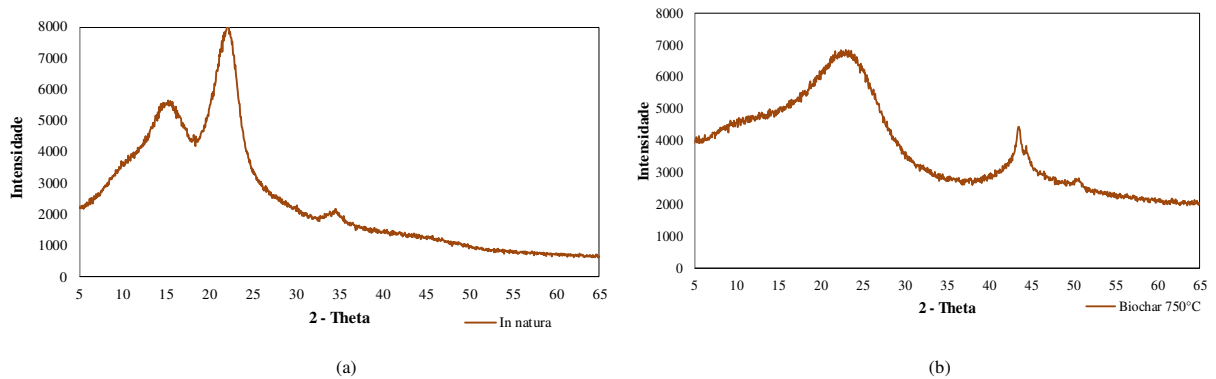


Fonte: Autora (2025)

No ensaio de Chapelle para a amostra de BC750 e para o material *in natura* NAT, observou-se que a amostra BC750 apresentou atividade pozolânica, já que o valor mínimo estabelecido para verificação do material como pozolânico é de 436 mg Ca(OH)₂/g de adição de acordo com Hoppe filho et al., (2017). Portanto, com base na metodologia de avaliação da atividade pozolânica proposta pela ABNT NBR 5751:2015, as amostras com atividade pozolânica são classificadas como materiais passíveis de incorporação na composição de cimento Portland composto ou pozolânico.

Os resultados da difração de raios X conforme a Figura 26. Dois picos podem ser observados e distinguidos nos espectros da biomassa, Figura 26 (a), em $2\theta = 16^\circ$ e 22° , os quais estão relacionados à celulose cristalina. Para BC750, apresentados na Figuras 26 (b), observa-se que a pirólise da biomassa resultou na perda dos picos de celulose e levou à formação de uma estrutura amorfa no BC produzido. O padrão DRX do BC exibe um pico de difração fraco e longo em aproximadamente de $2\theta = 23,5^\circ$, o desenvolvimento da ordem atômica na estrutura do BC pode ser a explicação para esta observação (Gupta et al., 2020).

Figura 25 – (a) Difratorômetro de Raios X da amostra NAT. (b) Difratorômetro de Raios X da amostra B750.



Fonte: Autora 2025

A Tabela 14 apresenta os resultados de FRX das amostras de BC e NAT, nos quais os óxidos predominantes são o óxido de potássio, óxido de cálcio e o óxido de manganês. No estudo de Figueredo et al. (2017), também foi observada a presença relevante de óxido de cálcio e óxido de manganês após a pirólise a 500°C.

Tabela 14 – FRX das amostras

ID	K2O	SiO2	Fe2O3	SO3	Cr2O3	NiO	MnO	CaO	P2O5	MgO	Cl	TiO2
NAT	38,75	1,24	2,54	0,76	0,48	*	4,66	39,70	2,98	*	4,44	1,37
BC750	9,01	1,01	58,74	3,20	13,21	7,67	1,32	4,94	1,15	1,09	0,30	0,15

Fonte: Autora 2025

4.3.2 Influência do teor de substituição do cimento por biochar na resistência

Na Figura 27 estão apresentados os resultados de resistência à compressão (RC) aos 3, 7 e 28 dias. Observa-se à medida que aumenta o teor de substituição de BC a resistência mecânica decresce, isso se dá devido as partículas excessivas de BC. Segundo Choi; Yun; Lee (2012d), os autores substituíram 5% a 20% em peso do cimento na argamassa por biochar feito de capim-rabo-de-raposa e madeira nobre. O estudo demonstrou que a substituição de 5% do cimento por biochar aumentou a resistência à compressão em aproximadamente 10% após 28 dias. Contudo, também foi observado que, devido à elevada capacidade de retenção de água do biochar, a demanda de água da argamassa contendo biochar foi superior à argamassa de referência, contribuindo, assim, para a cura interna durante a fase de endurecimento.

Gupta; Kua; Low (2018d) também observaram de 40% na resistência aos 7 dias quando substituíram 2% da massa de cimento por BC de madeira mista. Além disso, Gupta; Kua; Pang, (2018c) relataram aumento da resistência aos 7 dias em 18, 13 e 10% após substituição de 0,50, 1 e 9%, respectivamente, por biochar de madeira mista pirolisada a 500 °C. O estudo também demonstrou aumentos de resistência de 16%, 10% e 9% aos 28 dias para substituições de biochar de 0,5, 1 e 2%, respectivamente. Entretanto, a melhoria da resistência mecânica após aos 28 dias foi inferior à observada após aos 7 dias.

Sirico et al. (2021b) investigaram os efeitos do BC derivado de madeira em compósitos sob condições de cura seca e úmida, e observaram um aumento na resistência para todos os tempos de cura após a substituição de 5% de cimento por BC.

Já Park et al. (2021c) avaliaram o efeito do BC de colza e do BC de madeira macia mista em matriz cimentícia, variando sua proporção de mistura entre 2 e 8% em massa. Foi constatado que a maior resistência foi alcançada com 4% de substituição, independentemente do tipo de BC. Resultados semelhantes foram observados em Kim et al. (2021), utilizaram BC feitos a partir de cascas de arroz incorporados com n-octadecano, arvores de abeto e palha de *Miscanthus*; a adição de 4% de BC aumentou a resistência dos espécimes, enquanto 6% de BC degradou as resistências. Assim, concluiu-se que a substituição de 4% da massa de cimento por BC pode melhorar tanto a resistência quanto a condutividade térmica, substituições superiores tenham provocado diminuição da condutividade térmica.

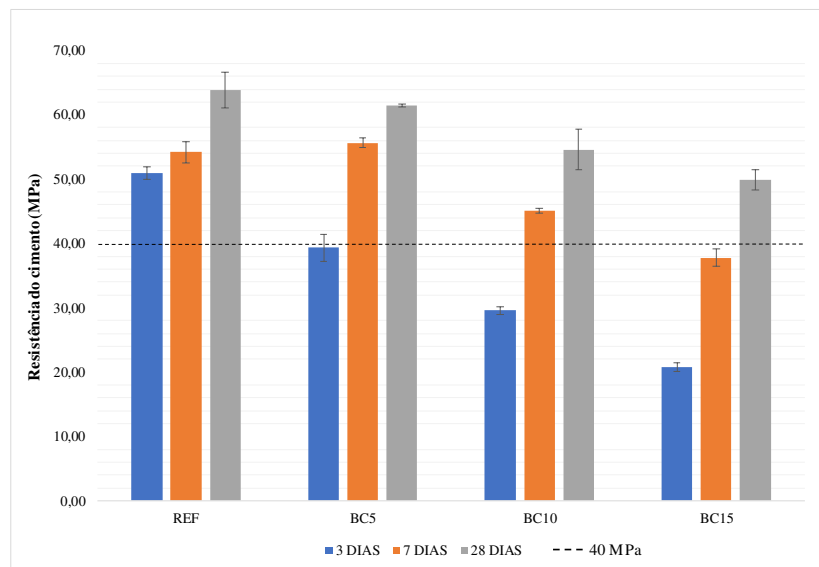
Em outro estudo Chindaprasirt; Rukzon (2008), substituíram 10% a 20% da massa do cimento por cinza de casca de arroz (CCR), observaram um aumento de 2% a 3% nas resistências à compressão de 7 e 120 dias. Todavia, quando a substituição foi elevada para 40%, ocorreu uma redução de 20% na resistência. Já Asadi Zeidabadi et al. (2018) envolvendo CCR mostrou que uma substituição de 5% de cimento por CCR aumentou a resistência a compressão em aproximadamente 12% em comparação com a do controle, o que foi atribuído aos efeitos de enchimento precoce das partículas de BC.

Entretanto, os estudos acima revelam que o aumento da taxa de substituição do BC causa aumento na porcentagem de carbono na matriz cimentícia, o que por sua vez aumenta a demanda de água, causando uma redução na resistência à compressão. Além disso, quando a taxa de substituição se eleva partículas excedentes se reúnem devido às forças de van der Waals, resultando na redução da resistência à compressão da argamassa. Após absorver uma

quantidade de água no interior da argamassa, a formação de produtos de hidratação diminui, o que leva ao aparecimento cavidades extensas e até mesmo fissuras (TAN et al., 2020).

De acordo com a Figura 27, a argamassa com teor de 5% de substituição apresentou resistência superior aos 7 dias; entretanto, aos 28 dias, a resistência da amostra de referência (REF) se destacou. A norma ABNT NBR 16697:2018 estabelece os requisitos mínimos de resistência do cimento aos 3, 7 e 28 dias, de acordo com o tipo de cimento Portland. Em todas as substituições, o critério mínimo foi atendido aos 28 dias de cura, com todas as amostras apresentando resistência superior a 40 MPa.

Figura 26 – Resistência à compressão



Fonte: Autora (2025)

Segundo os estudos realizados por Tan et al. (2020), o teor de substituição de 1% apresentou ganho de resistência aos 7 dias, quando comparada com as amostras padrão. Diferentemente, as amostras com maiores teores (3%, 5% e 10%), apresentaram diminuição da resistência em 3%, 5% e 10% respectivamente. Essa mesma tendência foi observada após os 28 dias, onde para o teor de 1% de BC aumentou a resistência mecânica, já para as substituições de 3%, 5% e 10% observou-se uma diminuição da resistência. Dessa forma, quando o teor de BC é superior de 5%, as resistências à compressão das amostras são inferiores à de referência.

4.3.3 Influência da resistência nas emissões de CO₂eq

Na Tabela 15 estão apresentados os resultados das emissões de CO₂ eq em quilogramas, para a produção de 100 kg de argamassa. A análise das emissões considerou exclusivamente as emissões relacionadas ao cimento, além da avaliação da quantidade de carbono fixo no BC com pirólise a 750°C. Observa-se que, para a argamassa de referência, a emissão foi de 74,2 kg de CO₂ eq, entretanto ao substituir 15% do cimento por BC, a emissão foi reduzida em 28,96%.

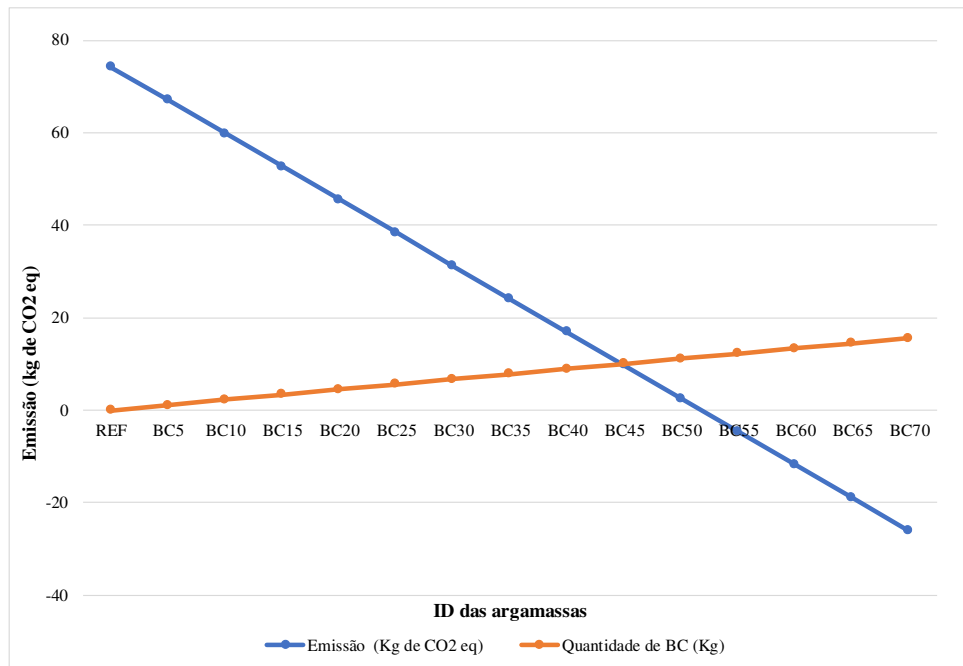
Tabela 15 – Emissão das amostras

ID	Emissão (Kg de CO ₂ eq) para o cimento	Teor de carbono fixo promovido pelo BC (kg)	Total de emissão referente ao cimento (kg de CO ₂ eq)
REF	742,00	*	742,00
BC5	704,90	34,50	670,40
BC10	667,80	69,00	598,80
BC15	630,70	103,60	527,10

Fonte: Autora (2025)

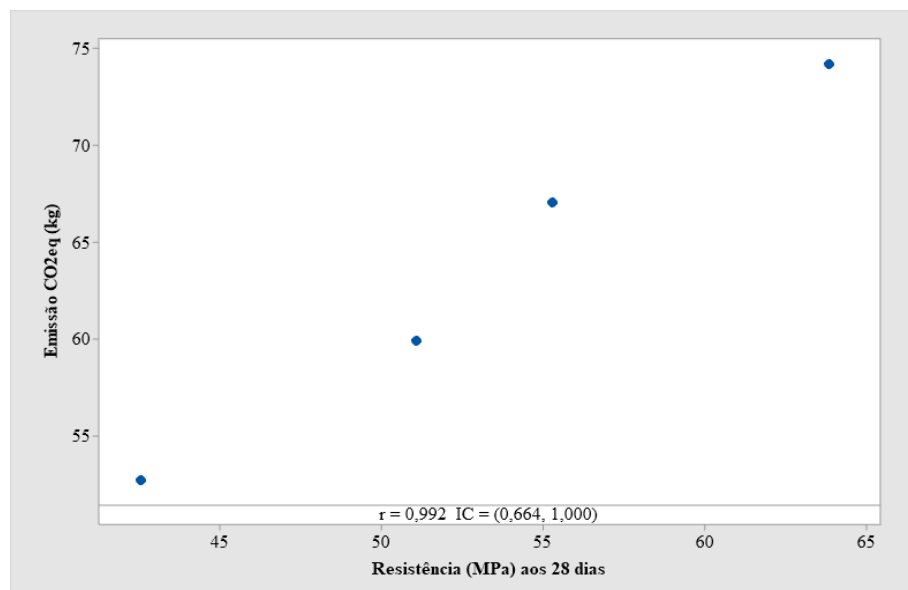
Além disso, ao correlacionar as emissões com a substituição do cimento por BC, observa-se que, ao substituir 45% do cimento, o BC consegue compensar as emissões de CO₂ geradas pela produção de cimento, uma vez que ele capaz de fixar carbono. Assim, para substituições superiores a 45%, o BC passa a fixar mais carbono do que é emitido pelo cimento, gerando crédito de carbono em vez de emissões, como mostrado na Figura 28.

Entretanto, quando se trata de resistência mecânica a substituição de 45% do cimento por biochar em argamassas tende a resultar em uma redução significativa da resistência à compressão. Essa diminuição é atribuída à diluição do conteúdo de cimento ativo, ao aumento da porosidade e à absorção de água pelo biochar, o que compromete as reações de hidratação do cimento (Chindapasirt; Rukzon, 2008).

Figura 27 – Correlação entre resistência e emissão de CO₂ eq

Fonte: Autora (2025)

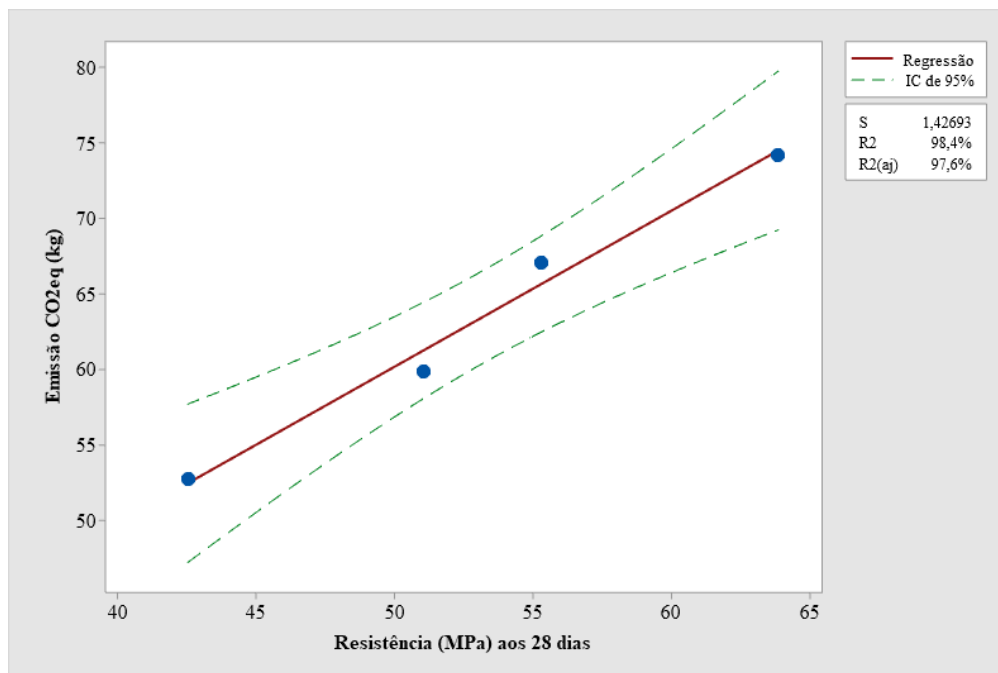
Na Figura 29 apresenta-se o gráfico de correlação entre a emissão das amostras e a resistência mecânica, mostrando que a relação entre emissão de CO₂ eq e resistência é bem definida, com um valor de $r = 0,992$. Além disso, a correlação é positiva, indicando que a medida que a resistência aumenta a emissão também. O tipo de correlação utilizada foi o Pearson, com 95% de significância.

Figura 28 – Correlação estatística entre emissão e resistência mecânica

Fonte: Autora (2025)

O modelo de regressão para as emissões das amostras está descrito na Equação 1, onde C representa a emissão de CO₂ eq em quilogramas e B a resistência mecânica à compressão aos 28 dias em MPa. De acordo com o modelo, pode-se observar que R²aj foi de 97,6%, indicando sua adequabilidade aos resultados obtidos experimentalmente. Além disso, o R² demonstra que 98,4% das variáveis de cálculo podem ser explicadas pelo modelo, conforme Figura 29.

Figura 29 – Regressão para emissão e resistência mecânica



Fonte: Autora (2025)

$$C = 8,472 + 1,034 B \quad (\text{Equação 1})$$

5 CONCLUSÕES

A primeira parte deste estudo teve como objetivo investigar o uso do biochar como uma substituição parcial de areia e seu efeito nas propriedades mecânicas e físicas da argamassa de cimento. Para a produção de argamassa, foram realizadas substituições de 10 e 20%, utilizando três tratamentos com diferentes temperaturas, 450°C, 650°C e 750°C. Em seguida, a segunda parte investigou o efeito da substituição parcial de cimento por biochar nas propriedades mecânicas da resistência do cimento e a avaliação da ecoeficiência. Para a produção de

argamassa, foram realizadas substituições de 5, 10 e 15%, utilizando exclusivamente o biochar obtido a partir da biomassa de eucalipto a temperaturas de 750°C.

As seguintes conclusões podem ser tiradas para a primeira análise realizada, substituição da areia por biochar:

- A resistência média da argamassa com 10% de substituição de BC aos 56 dias foi 57% superior à da argamassa com 20% de substituição.
- Aos 28 dias, a amostra que obteve maior resistência mecânica tração na flexão foi a 10B650. No entanto, aos 56 dias, a amostra 10B750 demonstrou um maior ganho de resistência.
- Para a aderência à tração as amostras de BC que apresentaram maiores resistências foram 10B450 e 10B750.
- Partículas de biochar introduziram uma estrutura porosa na argamassa de cimento, o que causou um aumento na absorção por capilaridade da água.
- Para a análise de VPU as argamassas apresentaram o processo de cura similar, se diferenciando na fase 3. A argamassa de referência (REF) apresentou uma curva mais acentuada, enquanto a argamassa 10B750 apresentou uma curva mais suave, indicando que apesar da redução em comparação à fase 2, o processo de hidratação continuou a se desenvolver durante a fase 3.
- A amostra BC750 apresentou atividade pozolânica, sendo classificada como material passível de incorporação na composição de cimento Portland composto ou pozolânico.

Já para a segunda parte do trabalho, substituição do cimento por biochar, podem ser tiradas as seguintes conclusões:

- A substituição do BC pelo cimento reduz a resistência mecânica, sendo uma correlação crescente, onde observou-se que maior substituição do cimento por BC menor a redução da resistência.
- Para uma substituição de 5% de cimento por BC a resistência reduziu quando comparada a resistência de referência em 13,39%.
- Para a análise estatística observou-se que menor emissão menor resistência, para as amostras avaliadas.
- Verificou-se que, a partir de 45% de substituição do cimento, as emissões relacionadas ao cimento são neutralizadas, começando a gerar crédito de carbono.

- A resistência média da argamassa com 10% de substituição de BC aos 56 dias foi 57% superior à da argamassa com 20% de substituição.
- Aos 28 dias, a amostra que obteve maior resistência mecânica tração na flexão foi a 10B650. No entanto, aos 56 dias, a amostra 10B750 demonstrou um maior ganho de resistência.
- Para a aderência à tração as amostras de BC que apresentaram maiores resistências foram 10B450 e 10B750.
- Partículas de biochar introduziram uma estrutura porosa na argamassa de cimento, o que causou um aumento na absorção por capilaridade da água.
- Para a análise de VPU as argamassas apresentaram o processo de cura similar, se diferenciando na fase 3. A argamassa de referência (REF) apresentou uma curva mais acentuada, enquanto a argamassa 10B750 apresentou uma curva mais suave, indicando que apesar da redução em comparação à fase 2, o processo de hidratação continuou a se desenvolver durante a fase 3.

5.1 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Como sugestão para trabalhos futuros, têm-se:

Em relação à novidade do uso de biochar como uma substituição parcial de areia, sugere-se uma investigação mais aprofundada para estudar o desempenho de longo prazo, bem como análise de seu comportamento acústico, térmico e de durabilidade. Neste caso, sugere-se aumentar a temperatura de pirólise que pode ser associada ao aumento do teor de carbono e da razão O:C (grau de aromaticidade). Isso causa uma maior estabilidade estrutural e química que melhora a durabilidade da argamassa.

Já para a argamassa com substituição do cimento pelo biochar, em relação à ACV, sugere-se uma investigação mais aprofundada para estudar o desempenho de longo prazo das amostras, afim de verificar a relação entre emissão e resistência. Neste caso, sugere-se também avaliar a resistência mecânica e ecoeficiência para BC com maiores temperaturas de pirólise, como 800°C e 850°C.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ASADI ZEIDABADI, Zahra *et al.* Synthesis, characterization and evaluation of biochar from agricultural waste biomass for use in building materials. **Construction and Building Materials**, v. 181, p. 301–308, ago. 2018.

AHMAD, S. *et al.* High performance self-consolidating cementitious composites by using micro carbonized bamboo particles. **Materials & Design**, v. 76, p. 223–229, jul. 2015.

AKHTAR, A.; SARMAH, A. K. Novel biochar-concrete composites: Manufacturing, characterization and evaluation of the mechanical properties. **Science of The Total Environment**, v. 616–617, p. 408–416, mar. 2018.

ASADI ZEIDABADI, Z. *et al.* Synthesis, characterization and evaluation of biochar from agricultural waste biomass for use in building materials. **Construction and Building Materials**, v. 181, p. 301–308, ago. 2018.

AKHTAR, A.; SARMAH, A. K. Novel biochar-concrete composites: Manufacturing, characterization and evaluation of the mechanical properties. **Science of The Total Environment**, v. 616–617, p. 408–416, mar. 2018.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 5751:2014** – Cimento Portland – Determinação da finura pelo método de peneira 45 (325 mesh). Rio de Janeiro, 2014.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 15895:2010** – Cimento Portland – Determinação da resistência à compressão de corpos de prova com diâmetro superior a 50 mm. Rio de Janeiro, 2010.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 12653:2015** – Materiais pozolânicos – Requisitos. Rio de Janeiro: ABNT, 2015.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 7215:2019** – Cimento Portland – Determinação da resistência à compressão. Rio de Janeiro, 2019.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 5751:2014** – Cimento Portland – Determinação do índice de finura. Rio de Janeiro, 2014.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR ISO 14045:2014** – Avaliação do ciclo de vida – Princípios, requisitos e orientações para avaliação do desempenho ambiental de produtos e processos (Ecoeficiência). Rio de Janeiro, 2014.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 5751:2014** – Cimento Portland – Determinação do índice de finura. Rio de Janeiro, 2014.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 16697:2018** – Cimento Portland de alta resistência inicial (CPV-ARI) – Requisitos. Rio de Janeiro, 2018.

CARMI, I.; KRONFELD, J.; MOINESTER, M. Sequestration of atmospheric carbon dioxide as inorganic carbon in the unsaturated zone under semi-arid forests. **CATENA**, v. 173, p. 93–98, fev. 2019.

CHINDAPRASIRT, P.; RUKZON, S. Strength, porosity and corrosion resistance of ternary blend Portland cement, rice husk ash and fly ash mortar. **Construction and Building Materials**, v. 22, n. 8, p. 1601–1606, ago. 2008.

CHOI, Won Chang; YUN, Hyun Do; LEE, Jae Yeon. Mechanical Properties of Mortar Containing Bio-Char From Pyrolysis. **Journal of the Korea institute for structural maintenance and inspection**, v. 16, n. 3, p. 67–74, 30 maio 2012.

FIGUEREDO, N. A. DE et al. Characterization of biochars from different sources and evaluation of release of nutrients and contaminants. **REVISTA CIÊNCIA AGRONÔMICA**, v. 48, n. 3, 2017.

GUPTA, Souradeep; KUA, Harn Wei; LOW, Chin Yang. Use of biochar as carbon sequestering additive in cement mortar. **Cement and Concrete Composites**, v. 87, p. 110–129, mar. 2018.

GUPTA, Souradeep; KUA, Harn Wei; PANG, Sze Dai. Biochar-mortar composite: Manufacturing, evaluation of physical properties and economic viability. **Construction and Building Materials**, v. 167, p. 874–889, abr. 2018.

GUO, X. et al. Carbon reduction in cement industry - An indigenized questionnaire on environmental impacts and key parameters of life cycle assessment (LCA) in China. **Journal of Cleaner Production**, v. 426, p. 139022, nov. 2023.

GUPTA, S. et al. Application of biochar from coconut and wood waste to reduce shrinkage and improve physical properties of silica fume-cement mortar. **Construction and Building Materials**, v. 262, p. 120688, nov. 2020.

GUPTA, S. et al. Carbon sequestration in cementitious composites using biochar and fly ash – Effect on mechanical and durability properties. **Construction and Building Materials**, v. 291, p. 123363, jul. 2021.

GUPTA, S.; KUA, H. W.; LOW, C. Y. Use of biochar as carbon sequestering additive in cement mortar. **Cement and Concrete Composites**, v. 87, p. 110–129, mar. 2018.

GUPTA, S.; KUA, H. W.; PANG, S. D. Biochar-mortar composite: Manufacturing, evaluation of physical properties and economic viability. **Construction and Building Materials**, v. 167, p. 874–889, abr. 2018.

HOPPE FILHO, J. et al. Atividade pozolânica de adições minerais para cimento Portland (Parte I): Índice de atividade pozolânica (IAP) com cal, difração de raios-X (DRX), termogravimetria (TG/DTG) e Chapelle modificado. **Matéria (Rio de Janeiro)**, v. 22, n. 3, 10 ago. 2017.

KIM, Young Uk *et al.* Evaluation of thermal properties of phase change material-integrated artificial stone according to biochar loading content. **Construction and Building Materials**, v. 305, p. 124682, out. 2021.

LIU, W.; LI, K.; XU, S. Utilizing bamboo biochar in cement mortar as a bio-modifier to improve the compressive strength and crack-resistance fracture ability. **Construction and Building Materials**, v. 327, p. 126917, abr. 2022.

PARK, J. H. et al. Analysis of biochar-mortar composite as a humidity control material to improve the building energy and hygrothermal performance. **Science of The Total Environment**, v. 775, p. 145552, jun. 2021a.

PARK, J. H. et al. Analysis of biochar-mortar composite as a humidity control material to improve the building energy and hygrothermal performance. **Science of The Total Environment**, v. 775, p. 145552, jun. 2021b.

PRÉ SUSTAINABILITY. **SimaPro database manual – Methods library**.

PARK, Ji Hun *et al.* Analysis of biochar-mortar composite as a humidity control material to improve the building energy and hygrothermal performance. **Science of The Total Environment**, v. 775, p. 145552, jun. 2021.

SIRICO, Alice *et al.* Biochar from wood waste as additive for structural concrete. **Construction and Building Materials**, v. 303, p. 124500, out. 2021.

TAN, Kanghao *et al.* Properties of cement mortar containing pulverized biochar pyrolyzed at different temperatures. **Construction and Building Materials**, v. 263, p. 120616, dez. 2020