

**UNIVERSIDADE DE CAXIAS DO SUL
ÁREA DAS CIÊNCIAS EXATAS E ENGENHARIAS
ENGENHARIA CIVIL**

FILIPPE CARBONI FIM

**ANÁLISE DAS PROPRIEDADES DO CONCRETO COM SUBSTITUIÇÃO
PARCIAL DO CIMENTO POR BIOCHAR**

**CAXIAS DO SUL
2025**

FILIFE CARBONI FIM

**ANÁLISE DAS PROPRIEDADES DO CONCRETO COM SUBSTITUIÇÃO
PARCIAL DO CIMENTO POR BIOCHAR**

Trabalho de Conclusão de Curso
apresentado à Universidade de Caxias do
Sul como requisito para graduação em
Engenharia Civil.

Orientador: Prof. Dr. Vinício Cecconello

CAXIAS DO SUL

2025

FILIFE CARBONI FIM

**ANÁLISE DAS PROPRIEDADES DO CONCRETO COM SUBSTITUIÇÃO
PARCIAL DO CIMENTO POR BIOCHAR**

Trabalho de Conclusão de Curso
apresentado à Universidade de Caxias do
Sul como requisito para graduação em
Engenharia Civil.

Orientador: Prof. Dr. Vinício Cecconello

Aprovado em 01/12/2025

Banca Examinadora

Prof. Dr. Vinício Cecconello
Universidade de Caxias do Sul

Prof. Me. Maurício Monteiro Almeron
Universidade de Caxias do Sul

Prof. Dr. Gustavo Ribeiro da Silva
Universidade de Caxias do Sul

RESUMO

FIM, Filipe Carboni. **Análise das propriedades do concreto com substituição parcial do cimento por biochar.** 2025. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Civil, Universidade de Caxias do Sul.

A indústria da construção civil é responsável por uma parcela significativa das emissões globais de CO₂, impulsionada principalmente pela produção de cimento Portland e pela extração intensiva de recursos naturais. Neste contexto, o biocarvão (biochar) emerge como uma alternativa promissora para mitigar esses impactos, atuando como material cimentício suplementar e agente de cura interna. O presente trabalho teve como objetivo analisar a influência da substituição parcial do cimento por biochar nas propriedades do concreto no estado fresco e endurecido. O programa experimental envolveu a produção de um traço de referência (REF) e traços com substituição de 5% de biochar seco (Série S), além de traços com 2,5%, 5,0% e 7,5% de biochar pré-umedecido (Série PU). Foram realizados ensaios de abatimento do tronco de cone, resistência à compressão axial, tração por compressão diametral, módulo de elasticidade e absorção de água por capilaridade. Os resultados demonstraram que o biochar seco comprometeu severamente a trabalhabilidade, exigindo um aumento na relação água/cimento, embora tenha proporcionado ganhos de resistência e redução da capilaridade devido à cura interna. A metodologia de pré-umedecimento mostrou-se eficaz para manter a consistência e o controle da relação a/c. O traço com 2,5% de biochar pré-umedecido (BC-2.5-PU) apresentou o melhor desempenho global, superando o concreto de referência em resistência à compressão (26,72 MPa) e tração aos 28 dias, sem prejuízo à trabalhabilidade. Contudo, teores mais elevados (5,0% e 7,5%) na série pré-umedecida resultaram em queda de resistência, indicando que o biochar atua como uma inclusão menos rígida na matriz. Conclui-se que o uso de biochar pré-umedecido em baixos teores é técnica e ambientalmente viável, contribuindo para a sustentabilidade do concreto através da cura interna e potencial sequestro de carbono.

Palavras-chave: Concreto sustentável. Biocarvão. Cura interna. Biochar.

ABSTRACT

FIM, Filipe Carboni. **Analysis of the properties of concrete with partial replacement of cement by biochar.** 2025. Bachelor's Thesis (Civil Engineering) – University of Caxias do Sul, Caxias do Sul, 2025.

The construction industry is responsible for a significant portion of global CO₂ emissions, primarily driven by Portland cement production and intensive natural resource extraction. In this context, biochar emerges as a promising alternative to mitigate these impacts, acting as a supplementary cementitious material and internal curing agent. This study aimed to analyze the influence of partial cement replacement by biochar on the properties of concrete in fresh and hardened states. The experimental program involved the production of a reference mix (REF) and mixes with 5% dry biochar substitution (Series S), as well as mixes with 2.5%, 5.0%, and 7.5% pre-soaked biochar (Series PU). Tests were performed for slump, axial compressive strength, splitting tensile strength, static modulus of elasticity, and capillary water absorption. The results demonstrated that dry biochar severely compromised workability, requiring an increase in the water/cement ratio, although it provided strength gains and reduced capillarity due to internal curing. The pre-soaking methodology proved effective in maintaining consistency and controlling the w/c ratio. The mix with 2.5% pre-soaked biochar (BC-2.5-PU) presented the best overall performance, surpassing the reference concrete in compressive strength (26.72 MPa) and tensile strength at 28 days, without impairing workability. However, higher contents (5.0% and 7.5%) in the pre-soaked series resulted in decreased strength, indicating that biochar acts as a less rigid inclusion in the matrix. It is concluded that the use of pre-soaked biochar at low dosages is technically and environmentally viable, contributing to concrete sustainability through internal curing and potential carbon sequestration.

Keywords: Sustainable concrete. Biochar. Internal curing. Mechanical properties. Durability.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Imagens de MEV: (a) interface entre partículas de biochar e pasta de argamassa (ampliação de 200x) e (b) deposição de produtos de hidratação em poros do biochar e na interface (ampliação de 850x).....	21
Figura 2 – Fluxograma de atividades.....	35
Figura 3 – Curva granulométrica do agregado miúdo.....	38
Figura 4 – Aferição do abatimento do concreto.....	49
Figura 5 – Corpos de prova moldados.....	50
Figura 6 – Corpos de prova desformados.....	51
Figura 7 – Corpos de prova no tanque para cura.....	51
Figura 8 – Corpo de prova em processo de rompimento.....	53
Figura 9 - Posicionamento do corpo de prova.....	54
Figura 10 - Comparativo do abatimento dos corpos de prova com a água efetiva...	60
Figura 11 - Comparativo do abatimento dos corpos de prova com a água de ajuste... 61	
Figura 12 - Comparativo de resistência à compressão axial dos corpos de prova aos 7 dias.....	63
Figura 13 - Comparativo de resistência à compressão axial dos corpos de prova aos 28 dias.....	64
Figura 14 - Correlação entre resistência à compressão e a relação água/cimento utilizada.....	65
Figura 15 - Comparativo de resistência à compressão diametral dos corpos de prova.....	66
Figura 16 - Comparativo do módulo de elasticidade dos corpos de prova aos 28 dias.....	67
Figura 17 - Comparativo da absorção de água por capilaridade (A_t) dos corpos de prova.....	68
Figura 18 - Comparativo do coeficiente de capilaridade (C) dos corpos de prova....	69

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Fluidez e tempo de pega de argamassas contendo Biochar.....	23
Tabela 2 - Especificações médias do CP IV-32 RS.....	36
Tabela 3 - Composição granulométrica média do agregado miúdo.....	37
Tabela 4 – Traço de Referência (REF) por m ³ de Concreto.....	41
Tabela 5 - Cálculo da Capacidade de Absorção de água (%) do biochar.....	44
Tabela 6 - Composições em massa (kg/m ³) das séries de concreto.....	44
Tabela 7 – Relação água/aglomerante após ajuste no slump test.....	61

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO.....	9
1.1 OBJETIVOS.....	11
1.1.1 Objetivo Geral.....	11
1.1.2 Objetivo Específico.....	11
2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA.....	13
2.1 MUDANÇAS CLIMÁTICAS E SUSTENTABILIDADE NA CONSTRUÇÃO CIVIL	13
2.2 O CONCRETO E SEUS COMPONENTES.....	14
2.3 IMPACTOS AMBIENTAIS DOS MATERIAIS CONSTITUINTES DO CONCRETO..	15
2.4 ALTERNATIVAS SUSTENTÁVEIS AOS AGREGADOS DO CONCRETO.....	16
2.5 BIOCHAR: DEFINIÇÃO, PRODUÇÃO E CARACTERÍSTICAS.....	17
2.5.1 Interações microestruturais do biochar na matriz cimentícia.....	20
2.6 APLICAÇÃO DO BIOCHAR NA CONSTRUÇÃO CIVIL.....	22
2.6.1 Desafios para a aplicação em larga escala.....	26
2.6.2 Necessidades de normalização e direcionamentos para pesquisas futuras	28
2.7 ESTUDOS DE CASO: BIOCHAR NA CONSTRUÇÃO CIVIL.....	29
2.8 BIOCHAR E O DESENVOLVIMENTO SUSTENTÁVEL NA CONSTRUÇÃO.....	31
3 METODOLOGIA DE PESQUISA.....	34
3.1 CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS.....	36
3.1.1 Cimento Portland.....	36
3.1.2 Agregado Graúdo.....	36
3.1.4 Biochar: Seleção, Preparo e Caracterização.....	39
3.2 DELINEAMENTO EXPERIMENTAL E DOSAGEM DOS CONCRETOS.....	40
3.2.1 Traço de Referência e Dosagem.....	41
3.2.2 Pré-umedecimento e Cálculo da Água de Compensação.....	41
3.2.3 Definição e Composição dos Traços Experimentais.....	44
3.2.3.1 Análise das Composições.....	45
3.3 METODOLOGIA DOS ENSAIOS.....	47
3.3.1 Procedimento de Mistura.....	47
3.3.2 Ensaio de Abatimento do Tronco de Cone (Estado Fresco).....	48
3.3.3 Moldagem e Cura dos Corpos de Prova.....	49
3.3.4 Resistência à Compressão Axial.....	52
3.3.5 Resistência à Tração por Compressão Diametral.....	53
3.3.6 Módulo de Elasticidade Estático.....	54
3.3.7 Absorção de Água por Capilaridade e Coeficiente de Capilaridade.....	55

3.3.8 Avaliação da Cura Interna.....	57
3.3.9 Apresentação dos resultados.....	58
4 RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	59
4.1 TRABALHABILIDADE DAS MISTURAS NO ESTADO FRESCO.....	59
4.2 RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO AXIAL.....	62
4.3 RESISTÊNCIA À TRAÇÃO POR COMPRESSÃO DIAMETRAL.....	66
4.4 MÓDULO DE ELASTICIDADE ESTÁTICO.....	67
4.5 ABSORÇÃO DE ÁGUA POR CAPILARIDADE.....	68
5 CONCLUSÃO.....	70
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	72

1 INTRODUÇÃO

O aumento constante da temperatura média global é um dos indicadores mais evidentes da intensificação do efeito estufa e das mudanças climáticas. A concentração crescente de gases de efeito estufa (GEE), como o dióxido de carbono (CO_2), metano (CH_4) e óxidos de nitrogênio (NO_x), tem resultado em desequilíbrios climáticos, derretimento de geleiras, eventos meteorológicos extremos e impactos significativos nos ecossistemas naturais e na saúde humana (Senadheera et al., 2023). Esses fenômenos colocam a urgência da redução de emissões como uma prioridade mundial, conforme apontado por diversos estudos e relatórios sobre o clima (IPCC, 2018 *apud* Senadheera et al., 2023).

A indústria da construção civil é responsável por uma parcela expressiva dessas emissões globais. A produção de cimento Portland, material essencial na formulação do concreto, é uma das maiores fontes industriais de emissão de CO_2 , representando cerca de 7% a 8% das emissões globais desse gás (Barbhuiya et al., 2024; Senadheera et al., 2023). Além disso, outras etapas do ciclo de vida das edificações, como extração de matérias-primas, transporte, fabricação de componentes e demolição, também contribuem para a liberação de poluentes atmosféricos e resíduos sólidos (Barbhuiya et al., 2024; Senadheera et al., 2023). Na etapa de extração de matérias-primas, por exemplo, a exploração dos agregados naturais, como a areia e a brita, causa degradação de ecossistemas, erosão de margens fluviais e aumento da pegada de carbono associada à extração, transporte e beneficiamento (De Bortoli, 2023).

Nesse cenário, torna-se essencial a busca por estratégias que contribuam para a mitigação das emissões de CO_2 ao longo de todas as etapas do processo construtivo (Mekky et al., 2024; Senadheera et al., 2023). Dentre essas estratégias, destacam-se as abordagens que envolvem a substituição parcial de materiais convencionais por insumos sustentáveis e com menor impacto ambiental. Soluções inovadoras, como o uso de materiais de origem biológica ou industrial reciclada, têm ganhado destaque em pesquisas recentes como alternativas viáveis à redução das emissões associadas à construção (Mekky et al., 2024).

Dentre essas alternativas, o biochar tem emergido como uma solução

promissora (Barbhuiya et al., 2024; Senadheera et al., 2023). Trata-se de um material carbonáceo obtido a partir da pirólise – decomposição térmica em atmosfera com oxigênio limitado ou ausente – de biomassa, como resíduos agrícolas e orgânicos (Lehmann; Joseph, 2009; Barbhuiya et al., 2024; Senadheera et al., 2023). Originalmente aplicado como condicionador de solo na agricultura, o biochar passou a ser estudado no contexto da engenharia civil por seu potencial em reduzir emissões e, simultaneamente, agregar desempenho técnico aos materiais de construção (Senadheera et al., 2023; Barbhuiya et al., 2024). Sua incorporação no concreto vem sendo considerada uma estratégia multifacetada: sequestrar carbono de forma estável e promover a redução do uso de cimento – um dos principais emissores de CO₂ industriais – ou promover a redução do uso de agregados naturais que, além de escassos, também apresentam significativa pegada de carbono associada à sua extração (Roychand et al., 2023; De Bortoli, 2023; Barbhuiya et al., 2024).

Além dos benefícios ambientais, o biochar apresenta propriedades técnicas desejáveis quando incorporado ao concreto. Pesquisas apontam que o material pode promover o aumento da resistência mecânica, melhora da durabilidade, controle da cura interna, redução de condutividade térmica, melhoria na trabalhabilidade (em certas granulometrias e proporções) e redução da massa específica do concreto por ser mais leve que os agregados convencionais (Barbhuiya et al., 2024; Mekky et al., 2024; Roychand et al., 2023; Senadheera et al., 2023).

A aplicação do biochar na construção civil, particularmente na produção de concreto, representa um avanço importante na direção da sustentabilidade ambiental. Ao promover o reaproveitamento de resíduos orgânicos, reduzir a demanda por cimento ou agregados naturais e sequestrar carbono de maneira estável, essa tecnologia se alinha aos Objetivos de Desenvolvimento Sustentável da ONU e às exigências ambientais da engenharia contemporânea (Mekky et al., 2024; ONU, 2015). O cruzamento de resultados de diferentes pesquisas aponta que o uso do biochar em matrizes cimentícias pode proporcionar uma sinergia entre desempenho técnico e responsabilidade ecológica, consolidando-se como uma alternativa viável para construções mais limpas e resilientes (Barbhuiya et al., 2024;

Mekky et al., 2024).

Dessa maneira, este trabalho tem como objetivo investigar e comparar o desempenho de diferentes formulações de concreto com a substituição parcial de cimento por biochar, incluindo um traço convencional (REF) e traços experimentais com diferentes teores de substituição de cimento por biochar (2,5%, 5,0% e 7,5%), comparando uma abordagem com adição do biochar a seco (somente para o traço de 5% de substituição) e outra com o biochar pré-umedecido com compensação de água (traços com 2,5%, 5,0% e 7,5% de substituição). Como metodologia, serão realizadas misturas e moldados corpos de prova, bem como estudos laboratoriais para avaliar as propriedades físicas, mecânicas e hidráulicas de cada formulação, incluindo resistência à compressão, resistência à tração na flexão, módulo de elasticidade e avaliação da capacidade de cura interna.

1.1 OBJETIVOS

1.1.1 Objetivo Geral

O objetivo geral do trabalho é analisar a influência da substituição parcial do cimento Portland por biochar nas propriedades do concreto no estado fresco e endurecido.

1.1.2 Objetivo Específico

Os objetivos específicos do trabalho são:

- a) realizar a dosagem dos concretos, definindo um traço de referência (REF) e traços experimentais com diferentes teores de substituição de cimento por biochar (2,5%, 5,0% e 7,5%), comparando uma abordagem com adição do biochar a seco e outra com o biochar pré-umedecido e com compensação de água;
- b) avaliar a trabalhabilidade das misturas no estado fresco por meio do ensaio de abatimento do tronco de cone;

- c) determinar o desempenho mecânico do concreto por meio do ensaio de resistência à compressão axial aos 7 e 28 dias;
- d) determinar a resistência à tração por compressão diametral dos concretos aos 28 dias;
- e) determinar o módulo de elasticidade estático aos 28 dias;
- f) determinar a absorção de água por capilaridade e coeficiente de capilaridade
- g) avaliar a cura interna;

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Neste capítulo, será apresentada a revisão da literatura que serve como base para o desenvolvimento deste trabalho. Serão abordados os principais conceitos relacionados à sustentabilidade na construção civil, com foco no impacto ambiental do cimento Portland. Em seguida, serão detalhadas as propriedades do concreto e, por fim, será explorado o biochar como um potencial material cimentício suplementar, justificando a sua aplicação na presente pesquisa.

2.1 MUDANÇAS CLIMÁTICAS E SUSTENTABILIDADE NA CONSTRUÇÃO CIVIL

As mudanças climáticas constituem um dos principais desafios enfrentados pela sociedade contemporânea. A crescente concentração de gases de efeito estufa (GEE), como o dióxido de carbono (CO_2), metano (CH_4) e óxidos de nitrogênio (NO_x), tem sido amplamente associada ao aumento da temperatura média global, à intensificação de eventos climáticos extremos e à alteração dos padrões hidrológicos e ecológicos do planeta (Senadheera et al., 2023).

A produção de cimento Portland, componente essencial do concreto, é uma das atividades industriais com maior impacto climático, sendo responsável por 7% a 8% de todas as emissões de CO_2 globais (Barbhuiya et al., 2024). Essa atividade insere o setor da construção civil como um dos principais contribuintes para as emissões antrópicas de gases de efeito estufa (Barbhuiya et al., 2024; Senadheera et al., 2023). Os impactos, no entanto, vão além da fabricação do cimento. Toda a cadeia produtiva, desde a exploração de matérias-primas como areia e brita — que pode degradar ecossistemas e causar erosão (De Bortoli, 2023) — até o transporte de materiais, a fase de uso e a demolição das edificações, contribui de forma expressiva para a pegada ambiental do setor.

Diante disso, a promoção de práticas sustentáveis na construção civil tornou-se uma necessidade estratégica e ética (Barbhuiya et al., 2024). Isso inclui a adoção de materiais alternativos, reciclados ou de origem renovável, bem como a incorporação de tecnologias que reduzam o consumo de energia e a geração de

resíduos (Mekky et al., 2024). A busca por soluções ambientalmente responsáveis encontra respaldo nas metas dos Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS), especialmente no ODS 11 (Tornar as cidades e os assentamentos humanos inclusivos, seguros, resilientes e sustentáveis) e no ODS 13 (Tomar medidas urgentes para combater a mudança climática e seus impactos) (ONU, 2015).

Uma das abordagens promissoras nesse contexto é a substituição de insumos convencionais por materiais com menor impacto ambiental. O biochar, material carbonáceo oriundo da pirólise de biomassa, tem sido estudado como substituto parcial tanto do cimento quanto dos agregados naturais na produção de concreto para uso na construção civil, promovendo, algumas vezes, benefícios técnicos e ambientais relevantes (Roychand et al., 2023; Senadheera et al., 2023).

2.2 O CONCRETO E SEUS COMPONENTES

O concreto é um dos materiais de construção mais utilizados no mundo, devido à sua versatilidade, resistência mecânica, durabilidade e facilidade de moldagem (Mehta; Monteiro, 2014; Neville, 2016). Sua composição tradicional envolve basicamente cimento Portland, agregados miúdos (areia), agregados graúdos (brita) e água, podendo conter aditivos químicos para modificação de propriedades específicas (Mehta; Monteiro, 2014; Neville, 2016).

Cada um desses componentes exerce funções distintas e complementares. O cimento atua como agente aglutinante, iniciando reações de hidratação que conferem rigidez e resistência ao material (Mehta; Monteiro, 2014). Os agregados compõem o volume principal do concreto e são responsáveis por assegurar a estabilidade dimensional e contribuir para a resistência mecânica (Mehta; Monteiro, 2014). A água é fundamental para ativar as reações de hidratação do cimento e influencia diretamente a trabalhabilidade da mistura, além disso, o uso de aditivos, pode proporcionar propriedades especiais, como maior fluidez, controle do tempo de pega ou redução da permeabilidade (Mehta; Monteiro, 2014; Neville, 2016).

No que diz respeito aos agregados miúdos, a areia natural é tradicionalmente utilizada por sua ampla disponibilidade e relativa facilidade de extração (Bianchini et

al., 2005). No entanto, sua exploração intensiva tem causado danos ambientais significativos, como degradação de ecossistemas e esgotamento de recursos naturais (UNEP, 2019). De forma análoga, o cimento, embora essencial como aglomerante, apresenta um elevado passivo ambiental devido às emissões de CO₂ associadas à sua produção (Gowri et al., 2024; Senadheera et al., 2023). Dessa forma, torna-se necessário investigar materiais alternativos, como resíduos reciclados ou subprodutos industriais, que possam substituir parcialmente esses componentes sem comprometer a performance do concreto e com menor impacto ambiental (Mekky et al., 2024).

2.3 IMPACTOS AMBIENTAIS DOS MATERIAIS CONSTITUINTES DO CONCRETO

A produção de concreto gera impactos ambientais significativos que transcendem a fabricação do compósito final, estendendo-se à extração e ao processamento de seus constituintes básicos. No que tange aos agregados, a areia natural enfrenta problemas críticos devido à sua exploração intensiva. A taxa de extração atual excede significativamente a capacidade de reposição natural (John, 2009 apud UNEP, 2019; UNEP, 2019 apud Hackney et al., 2021). A remoção de areia de sistemas dinâmicos acarreta danos severos, como erosão costeira, redução de deltas e ameaças à biodiversidade aquática, além de desencadear conflitos socioeconômicos decorrentes da escassez do recurso (UNEP, 2019).

Paralelamente, a produção de cimento Portland representa um desafio ambiental ainda mais crítico. Este processo industrial é reconhecido como uma das maiores fontes antropogênicas de gases de efeito estufa, sendo responsável por aproximadamente 8% de todas as emissões globais de CO₂ (Gowri et al., 2024; Senadheera et al., 2023). A elevada pegada de carbono é atribuída tanto à descarbonatação química do calcário para a produção do clínquer quanto à queima intensiva de combustíveis fósseis necessária para atingir as altas temperaturas nos fornos rotativos (Mekky et al., 2024; Barbhuiya et al., 2024).

Além das emissões diretas, o ciclo de vida desses materiais envolve um elevado consumo energético em etapas de transporte e beneficiamento, contribuindo

para o agravamento da crise climática (De Bortoli, 2023). Diante desse cenário, a literatura técnica aponta a urgência na busca por alternativas (De Bortoli, 2023). Torna-se, portanto, imperativo investigar materiais como o biochar, que possam atuar como Materiais Cimentícios Suplementares (MCS) ou fíleres. Essa substituição parcial tem o potencial de reduzir a demanda por clínquer e mitigar a extração de recursos naturais finitos, alinhando a produção de concreto aos conceitos de construção verde e economia circular (Mekky et al., 2024; Roychand et al., 2023).

2.4 ALTERNATIVAS SUSTENTÁVEIS AOS AGREGADOS DO CONCRETO

Com a crescente escassez de recursos naturais e os impactos ambientais associados à mineração de agregados, a busca por alternativas sustentáveis para a substituição de agregados naturais tornou-se um dos focos da engenharia civil moderna (Maljaee et al., 2021; Barbhuiya et al., 2024). A substituição de materiais convencionais por insumos reciclados ou de origem renovável contribui diretamente para a redução da exploração de recursos finitos, mitigação das emissões de gases de efeito estufa e promoção da economia circular na construção civil (Mekky et al., 2024).

Dentre os principais materiais alternativos avaliados para substituição de agregados estão os resíduos de construção e demolição (RCD), resíduos industriais como cinzas volantes e escórias de alto forno, resíduos plásticos reciclados, e também resíduos orgânicos processados, como o biochar (Barbhuiya et al., 2024). Enquanto muitos desses materiais provêm de fontes minerais ou processos industriais que visam principalmente a redução do volume de resíduos ou o aproveitamento de subprodutos com propriedades cimentícias ou de fíler, o biochar se destaca por sua origem em biomassa residual diversa – como resíduos agrícolas, florestais ou mesmo lodos de esgoto – e pelo seu papel intrínseco no sequestro de carbono (Lehmann; Joseph, 2009; Senadheera et al., 2023). Esses materiais têm sido utilizados com diferentes propósitos, variando desde a substituição de agregados graúdos e miúdos até sua incorporação como fíleres ou, dependendo da biomassa de origem, como adições pozolânicas (Barbhuiya et al., 2024).

A eficácia técnica desses materiais alternativos depende de uma série de fatores, incluindo sua granulometria, porosidade, composição química, capacidade de absorção de água e, crucialmente, sua compatibilidade com a matriz cimentícia (Senadheera et al., 2023). No caso específico do biochar, diversas pesquisas apontam que sua aplicação pode influenciar positivamente propriedades como a retenção de umidade – o que pode ser benéfico para a cura interna do concreto –, a criação de uma porosidade controlada e, em algumas formulações e proporções, pode levar à melhoria da resistência mecânica e da durabilidade do concreto (Barbhuiya et al., 2024; Senadheera et al., 2023). Além disso, um dos grandes atrativos do uso do biochar reside na sua contribuição para o sequestro de carbono, pois o carbono fixado no biochar permanece estável, funcionando como um sumidouro de CO₂ ao longo da vida útil da estrutura de concreto (Barbhuiya et al., 2024).

Nesse contexto, alternativas como o biochar se destacam por potencialmente aliar benefícios ambientais e desempenho técnico (Mekky et al., 2024). Contudo, para a sua utilização em larga escala, especialmente no que diz respeito à substituição de agregados miúdos, ainda são necessários estudos mais aprofundados para consolidar diretrizes técnicas (Maljaee et al., 2021). Aspectos como os impactos na trabalhabilidade do concreto fresco e na resistência inicial ainda requerem avaliação sistemática para diferentes tipos e teores de biochar (Roychand et al., 2023; Barbhuiya et al.,

2.5 BIOCHAR: DEFINIÇÃO, PRODUÇÃO E CARACTERÍSTICAS

O biochar é um material sólido, rico em carbono, obtido a partir da decomposição térmica de biomassa em condições controladas de reduzida ou nula concentração de oxigênio, em um processo denominado pirólise (Lehmann; Joseph, 2009; Barbhuiya et al., 2024). Essa biomassa pode ter diversas origens, incluindo resíduos agrícolas (como palha de arroz, bagaço de cana-de-açúcar), resíduos florestais, lodos de esgoto e até resíduos orgânicos urbanos (Senadheera et al., 2023; Barbhuiya et al., 2024). O processo de pirólise, ao evitar a combustão completa da matéria orgânica, resulta na produção de um resíduo sólido com alta

estabilidade química e, frequentemente, grande área superficial e estrutura porosa (Senadheera et al., 2023; Barbhuiya et al., 2024).

Originalmente reconhecido por suas aplicações como condicionador de solo na agricultura, devido à sua capacidade de melhorar a retenção de água e nutrientes no solo (Lehmann; Joseph, 2009), o biochar tem demonstrado propriedades promissoras também em contextos de engenharia civil, especialmente na produção de concretos sustentáveis (Senadheera et al., 2023; Barbhuiya et al., 2024). Suas características físico-químicas, como elevada porosidade, capacidade de retenção de água, baixa densidade, presença de grupos funcionais ativos em sua superfície e estabilidade térmica, fazem dele um candidato atrativo para compor misturas cimentícias, seja como aditivo, substituto parcial do cimento ou dos agregados miúdos (Barbhuiya et al., 2024; Senadheera et al., 2023).

É importante mencionar que a estrutura altamente porosa do biochar (Barbhuiya et al., 2024; Senadheera et al., 2023) permite que ele funcione como um reservatório interno de água, promovendo a chamada "cura interna" do concreto (Dixit et al., 2019; Senadheera et al., 2023). Essa propriedade é particularmente interessante pois contribui para a continuidade das reações de hidratação do cimento mesmo após o endurecimento inicial da mistura, resultando em concretos com menor incidência de fissuras por retração autógena e, potencialmente, maior durabilidade (Senadheera et al., 2023; Dixit et al., 2019). Ademais, sua capacidade de absorver e reter certos íons pode, teoricamente, ajudar na mitigação de processos de corrosão de armaduras, ampliando a vida útil de estruturas armadas, embora este seja um campo que ainda necessita de investigações aprofundadas (Senadheera et al., 2023). É importante notar, contudo, que a elevada porosidade do biochar, se não acompanhada de uma matriz cimentícia circundante densa e de uma boa Zona de Transição Interfacial, poderia teoricamente facilitar a entrada de agentes agressivos em alguns cenários; no entanto, os efeitos benéficos do refino de poros e da cura interna geralmente tendem a melhorar a durabilidade geral (Senadheera et al., 2023).

Do ponto de vista ambiental, o biochar se destaca como uma tecnologia de sequestro de carbono (Barbhuiya et al., 2024; Mekky et al., 2024). Isso ocorre porque o carbono fixado na biomassa original, através da fotossíntese, é convertido

em uma forma mais estável no biochar durante a pirólise, permanecendo na forma sólida por longos períodos, potencialmente centenas ou milhares de anos, evitando sua liberação como CO₂ para a atmosfera (Lehmann; Joseph, 2009; Barbhuiya et al., 2024). Assim, quando incorporado ao concreto, além de poder substituir materiais convencionais de maior impacto ambiental, o biochar colabora com estratégias de neutralidade ou negatividade de carbono, alinhando-se às metas preconizadas nos acordos internacionais de combate às mudanças climáticas (Mekky et al., 2024; Barbhuiya et al., 2024)

As propriedades do biochar, e conseqüentemente sua adequação para uso em concreto, são fortemente influenciadas tanto pela natureza da biomassa utilizada como matéria-prima quanto pelas condições do processo de pirólise (Senadheera et al., 2023; Barbhuiya et al., 2024). Diferentes tipos de biomassa, como resíduos de madeira, palhas agrícolas, esterco animal ou lodo de esgoto, possuem composições químicas e estruturas físicas distintas (teor de lignina, celulose, hemicelulose, umidade, minerais) que resultarão em biochars com características variadas (Senadheera et al., 2023; Barbhuiya et al., 2024). Por exemplo, biomassas com alto teor de lignina tendem a produzir biochars com maior rendimento e estabilidade, enquanto aquelas com alto teor de cinzas podem gerar biochars com menor porosidade devido ao bloqueio de microporos (Senadheera et al., 2023).

Os parâmetros do processo de pirólise, como a temperatura final, a taxa de aquecimento e o tempo de residência, são cruciais na determinação das propriedades finais do biochar (Senadheera et al., 2023; Barbhuiya et al., 2024). Temperaturas de pirólise mais elevadas (e.g., > 500°C) geralmente resultam em biochars com maior teor de carbono fixo, maior área superficial, maior pH e maior estabilidade aromática, mas menor rendimento e menor teor de grupos funcionais oxigenados na superfície (Gupta et al., 2020; Senadheera et al., 2023). Por outro lado, temperaturas mais baixas podem preservar mais grupos funcionais e produzir maior rendimento de biochar, mas este pode ser menos estável e com menor teor de carbono (Senadheera et al., 2023). A taxa de aquecimento também influencia: taxas lentas favorecem a formação de mais biochar, enquanto taxas rápidas favorecem a produção de bio-óleo (Barbhuiya et al., 2024). Para aplicações em concreto, biochars com alta estabilidade de carbono e uma estrutura porosa bem

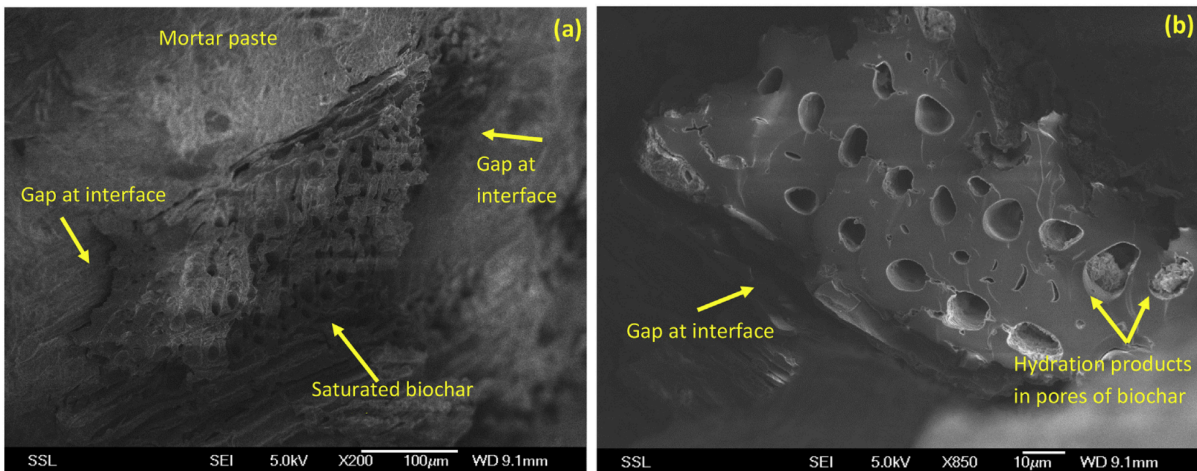
desenvolvida são geralmente desejáveis (Barbhuiya et al., 2024). A variabilidade inerente às matérias-primas e aos processos de produção impõe a necessidade de uma caracterização detalhada de cada tipo de biochar antes de sua incorporação ao concreto, visando otimizar o desempenho do compósito final (Roychand et al., 2023; Barbhuiya et al., 2024).

2.5.1 Interações microestruturais do biochar na matriz cimentícia

Quando o biochar é incorporado ao concreto, ele interage com a matriz cimentícia em nível microestrutural, o que pode levar a diversas alterações nas propriedades do compósito. Uma das interações primárias é o efeito fíler, onde as partículas de biochar, especialmente as mais finas, preenchem os vazios entre as partículas de cimento e os agregados, resultando em uma microestrutura mais densa e compacta (Senadheera et al., 2023; Barbhuiya et al., 2024). Essa densificação pode contribuir para o aumento da resistência mecânica e para a redução da permeabilidade do concreto (Senadheera et al., 2023).

Adicionalmente, a superfície das partículas de biochar pode atuar como sítios de nucleação para os produtos de hidratação do cimento, como o silicato de cálcio hidratado (C-S-H) e o hidróxido de cálcio (Ca(OH)_2) (Senadheera et al., 2023; Dixit et al., 2019). A presença desses sítios pode acelerar as reações de hidratação e promover uma distribuição mais uniforme dos hidratos na matriz, potencialmente melhorando o desenvolvimento da resistência em idades iniciais (Senadheera et al., 2023). Imagens de microscopia eletrônica de varredura (MEV) frequentemente revelam a deposição de produtos de hidratação na superfície e dentro dos poros acessíveis do biochar, indicando uma boa interação física (Dixit et al., 2019; Senadheera et al., 2023), como, por exemplo, pode ser observado na Figura 1 - (b).

Figura 1 – Imagens de MEV: (a) interface entre partículas de biochar e pasta de argamassa (ampliação de 200x) e (b) deposição de produtos de hidratação em poros do biochar e na interface (ampliação de 850x).



Fonte: Gupta, Kua e Low (2018, p. 125, fig. 13)

A Zona de Transição Interfacial (ZTI) entre as partículas de biochar e a pasta de cimento é outra área crucial, observado na Figura 1 - (b). Uma ZTI densa e bem aderida é fundamental para a transferência eficiente de tensões e, conseqüentemente, para as propriedades mecânicas do concreto (Barbhuiya et al., 2024). A natureza porosa do biochar pode permitir alguma penetração da pasta de cimento em seus poros superficiais, melhorando o intertravamento mecânico e a adesão (Senadheera et al., 2023). No entanto, uma absorção excessiva de água pelo biochar antes da hidratação completa da pasta circundante pode levar a uma ZTI mais porosa e fraca se não for devidamente controlada, por exemplo, através do pré-umedecimento do biochar (Barbhuiya et al., 2024). A depender da composição química do biochar, especialmente o teor e a reatividade da sílica e alumina presentes nas cinzas, podem ocorrer reações pozolânicas secundárias com o Ca(OH)_2 formado durante a hidratação do cimento (Senadheera et al., 2023). Biochars derivados de materiais ricos em sílica, como a casca de arroz, que contém sílica amorfa, são mais propensos a exibir essa característica, formando C-S-H adicional e refinando a microestrutura da ZTI e da matriz como um todo (Gupta et al., 2021; Senadheera et al., 2023).

2.6 APLICAÇÃO DO BIOCHAR NA CONSTRUÇÃO CIVIL

A incorporação do biochar na construção civil tem emergido como uma estratégia promissora para promover a sustentabilidade ambiental e melhorar o desempenho técnico dos materiais de construção, especialmente do concreto (Barbhuiya et al., 2024).

Uma das aplicações estudadas do biochar é sua utilização como substituto parcial da areia (agregado miúdo) no concreto (Roychand et al., 2023). Estudos indicam que a substituição de determinados teores de areia por biochar pode resultar em concretos com propriedades mecânicas e de durabilidade específicas. Por exemplo, pesquisas realizadas na RMIT University, na Austrália, demonstraram que o uso de biochar derivado de resíduos de café, pirolisado a 350°C e utilizado em substituição de 15% da areia (em volume), aumentou a resistência à compressão do concreto em até 29,3% (Roychand et al., 2023; Reuters, 2024).

Uma característica intrínseca do biochar, resultante de sua estrutura altamente porosa e grande área superficial, é sua elevada capacidade de absorção de água (Senadheera et al., 2023; Barbhuiya et al., 2024). Quando incorporado ao concreto como substituto de agregados, essa propriedade pode levar a um aumento significativo na demanda de água da mistura para manter uma determinada consistência, caso o biochar seja adicionado seco (Senadheera et al., 2023; Barbhuiya et al., 2024). As partículas de biochar absorvem rapidamente parte da água de amassamento, reduzindo a quantidade de água livre disponível para a hidratação do cimento e para conferir fluidez à mistura (Senadheera et al., 2023). Esse fenômeno pode resultar em misturas de concreto mais secas e menos trabalháveis se a quantidade de água não for ajustada (Barbhuiya et al., 2024).

A redução da água livre devido à absorção pelo biochar impacta diretamente a trabalhabilidade do concreto fresco, tornando a mistura mais coesiva e, por vezes, difícil de manusear e adensar (Senadheera et al., 2023; Barbhuiya et al., 2024). Tan et al. (2020) observaram que a fluidez da argamassa de cimento diminui com o aumento do teor de biochar, como observado na Tabela 1, atribuindo isso à estrutura porosa do biochar que retém água.

Para ilustrar quantitativamente esse comportamento reológico, os dados

obtidos por Tan et al. (2020) demonstram a variação das propriedades no estado fresco em função da dosagem e da temperatura de produção do biochar. Os resultados, apresentados na Tabela 1, evidenciam a redução progressiva do escoamento (fluidez) e a alteração nos tempos de pega à medida que o teor de biochar na mistura é incrementado, corroborando a influência direta da porosidade do material na demanda de água.

Tabela 1 – Fluidez e tempo de pega de argamassas contendo Biochar

Grupo	% adição de Biochar	Escoamento (mm)	Tempo de pega/horas (Inicial)	Tempo de pega/horas (Final)
Controle	0%	206	04:20	05:35
Biochar 400	1%	200	03:53	04:46
Biochar 400	3%	194	03:51	04:38
Biochar 400	5%	168	03:43	04:54
Biochar 400	10%	133	03:41	04:49
Biochar 500	1%	203	04:03	04:56
Biochar 500	3%	190	03:55	04:54
Biochar 500	5%	165	03:48	04:53
Biochar 500	10%	148	03:46	04:41
Biochar 600	1%	204	04:10	05:12
Biochar 600	3%	200	04:09	05:05
Biochar 600	5%	185	03:57	04:54
Biochar 600	10%	155	03:53	04:48
Biochar 700	1%	205	04:05	05:18
Biochar 700	3%	202	04:03	05:07
Biochar 700	5%	191	04:00	04:50
Biochar 700	10%	158	03:56	04:53

Fonte: Adaptada de Tan et al. (2020, p. 5).

Para contornar esse efeito e manter a trabalhabilidade desejada sem aumentar excessivamente a relação água/cimento (o que prejudicaria a resistência e a durabilidade), frequentemente se faz necessário o uso de aditivos superplastificantes (Tan et al., 2020). Em alguns casos, o aumento da dosagem de

superplastificante pode ser significativo, especialmente para teores mais altos de substituição por biochar (Dixit et al., 2019). A correta dosagem desses aditivos é crucial para garantir um concreto com boa trabalhabilidade, coesão e sem exsudação ou segregação excessiva. Akhtar e Sarmah (2018), em seu estudo de substituição de cimento, optaram por não usar superplastificantes, mantendo uma relação a/aglomerante baixa, o que demonstra diferentes abordagens no manejo da trabalhabilidade.

O pré-tratamento do biochar, como o pré-umedecimento (ou saturação), é uma estratégia eficaz para mitigar a perda de trabalhabilidade (Dixit et al., 2019; Gupta; Kua, 2018 apud Barbhuiya et al., 2024). Ao pré-saturar o biochar com parte da água de amassamento, sua capacidade de absorver água da mistura durante a concretagem é reduzida, preservando a trabalhabilidade e permitindo um controle mais preciso da relação água/cimento efetiva (Dixit et al., 2019). Este método também favorece a cura interna, onde a água retida nos poros do biochar é liberada gradualmente para auxiliar na hidratação contínua do cimento (Dixit et al., 2019; Senadheera et al., 2023).

O biochar, quando utilizado em proporções e com características adequadas, pode contribuir para a melhoria das propriedades mecânicas do concreto, como a resistência à compressão e à tração (Senadheera et al., 2023; Barbhuiya et al., 2024). Além disso, sua estrutura porosa permite a retenção de água, o que pode promover a cura interna do concreto, auxiliando na hidratação do cimento a longo prazo e, potencialmente, reduzindo a ocorrência de fissuras por retração autógena (Senadheera et al., 2023). Estudos também apontam para a potencial melhoria da resistência à carbonatação e à penetração de íons cloreto em concretos com biochar, fatores cruciais para a durabilidade de estruturas de concreto armado, embora os resultados possam variar dependendo do tipo de biochar e das condições de ensaio (Senadheera et al., 2023).

A eficácia da incorporação do biochar no concreto e os benefícios resultantes são intrinsecamente dependentes de uma série de fatores inter-relacionados, incluindo a dosagem utilizada, a granulometria do biochar, e suas características físico-químicas, as quais, por sua vez, são determinadas pela biomassa de origem e pelas condições específicas do processo de pirólise (Senadheera et al., 2023;

Barbhuiya et al., 2024). Não existe uma "receita universal", e a otimização é chave para cada aplicação (Maljaee et al., 2021).

A granulometria e a morfologia das partículas de biochar são igualmente cruciais (Senadheera et al., 2023; Barbhuiya et al., 2024). Partículas mais finas podem oferecer um melhor efeito de preenchimento (efeito fíler) e maior área superficial para nucleação de hidratos, enquanto partículas maiores podem se comportar mais como um agregado leve (Dixit et al., 2019; Senadheera et al., 2023). A alta porosidade e área superficial, embora benéficas para a cura interna e leveza, são responsáveis pela maior absorção de água, afetando a trabalhabilidade (Barbhuiya et al., 2024; Senadheera et al., 2023).

Como mencionado, as partículas finas do biochar podem atuar como fíler, preenchendo vazios e melhorando a compacidade da matriz, além de oferecerem maior área superficial para nucleação (Senadheera et al., 2023). Embora o aumento excessivo da área superficial de partículas finas geralmente eleve a demanda de água (Barbhuiya et al., 2024), o processo de moagem pode mitigar esse efeito ao reduzir a porosidade interna do material. Gupta e Kua (2019) observaram que o biochar moído, com partículas na faixa de 0,1-2 μm , apresentou menor impacto na viscosidade inicial da pasta do que o biochar não moído (2-100 μm). Isso ocorreu porque a moagem destruiu os macroporos superficiais responsáveis pela alta absorção de água no material grosso. Dessa forma, partículas menores podem otimizar a resistência, desde que seu teor seja controlado para evitar efeitos deletérios na trabalhabilidade e garantir um bom intertravamento, preferencialmente com bordas afiadas resultantes da moagem (Cosentino et al., 2019).

Portanto, é fundamental realizar uma caracterização detalhada do biochar antes de sua aplicação no concreto. Isso inclui análises de sua composição química (teor de carbono, cinzas, voláteis), propriedades físicas (densidade, área superficial, distribuição do tamanho de poros, granulometria) e pH (Senadheera et al., 2023; Barbhuiya et al., 2024). Essa caracterização permite não apenas prever o comportamento do biochar na mistura cimentícia, mas também ajustar a formulação do concreto (por exemplo, relação água/cimento, dosagem de aditivos) para otimizar o desempenho do compósito final e garantir a compatibilidade entre os materiais (Barbhuiya et al., 2024).

Estudos indicam que diferentes teores de substituição de biochar (seja de cimento ou de agregado) levam a resultados distintos nas propriedades do concreto (Senadheera et al., 2023; Barbhuiya et al., 2024). Por exemplo, ao substituir o cimento, dosagens relativamente baixas, como 1% a 5% em peso de cimento, têm sido reportadas como eficazes para ganhos em algumas propriedades mecânicas ou para promover a hidratação, sem comprometer excessivamente a trabalhabilidade (Senadheera et al., 2023; Barbhuiya et al., 2024). Tan et al. (2020) indicaram que 1-3% de biochar de madeira pulverizado, substituindo cimento, foi ótimo para melhorar a resistência da argamassa. Maljaee et al. (2021), em sua revisão, sugerem que um teor ótimo de cerca de 2% de biochar (como fíler ou substituição de cimento) contribui para a melhoria das propriedades mecânicas, com base na análise de diversos estudos. Akhtar e Sarmah (2018) também observaram melhorias na resistência à flexão com apenas 0,1% de substituição de cimento por biochar de cama de aviário ou casca de arroz. Quando usado como substituto de agregado miúdo, os teores podem ser mais elevados, como de 5% a 15%, ou até 20% como visto em alguns estudos (Roychand et al., 2023; Gowri et al., 2024), mas o impacto na demanda de água e trabalhabilidade deve ser cuidadosamente gerenciado (Senadheera et al., 2023).

2.6.1 Desafios para a aplicação em larga escala

Apesar do potencial promissor, a aplicação do biochar em concreto em larga escala enfrenta alguns desafios significativos. A variabilidade das propriedades do biochar, dependendo da matéria-prima e das condições de pirólise, dificulta a padronização e a previsibilidade do seu desempenho no concreto (Barbhuiya et al., 2024; Senadheera et al., 2023). Isso exige um controle de qualidade rigoroso e uma caracterização detalhada para cada lote de biochar (Maljaee et al., 2021).

A disponibilidade e o custo do biochar em grandes volumes e com qualidade consistente para a indústria da construção ainda são limitados em muitas regiões (Barbhuiya et al., 2024). Embora a produção possa utilizar resíduos, os processos de pirólise e eventuais tratamentos adicionais podem encarecer o material em comparação com os agregados tradicionais ou o cimento. A viabilidade econômica

pode ser melhorada com a produção em larga escala e a valorização de coprodutos da pirólise (Barbhuiya et al., 2024). Akhtar e Sarmah (2018) sugerem que, dependendo da escala de produção, o custo do concreto com biochar pode ser competitivo. A logística de coleta de biomassa e distribuição do biochar também são fatores a serem considerados (Mekky et al., 2024).

A falta de normas técnicas e especificações para o uso de biochar em concreto é um obstáculo para sua aceitação e implementação pela indústria (Barbhuiya et al., 2024; Senadheera et al., 2023). Engenheiros e construtores necessitam de diretrizes claras sobre dosagem, métodos de incorporação e ensaios de desempenho para garantir a segurança e a durabilidade das estruturas.

Questões relacionadas ao impacto na trabalhabilidade e a necessidade de ajustes nas misturas, como o uso de superplastificantes ou pré-umedecimento, podem representar um complicador nos processos construtivos convencionais (Senadheera et al., 2023; Barbhuiya et al., 2024). Finalmente, a percepção e aceitação pela indústria da construção e pelos consumidores finais em relação a um material relativamente novo também são barreiras a serem superadas através da disseminação de pesquisas e demonstrações de viabilidade técnica e econômica (Barbhuiya et al., 2024).

A aplicação prática do biochar na construção civil já está em andamento em diversos projetos. Na Austrália, por exemplo, o potencial de uso do biochar derivado de resíduos de café em calçadas tem sido demonstrado, com interesse de conselhos locais para o desenvolvimento de projetos piloto. Esses projetos piloto servem como base para a expansão do uso do biochar em larga escala na indústria da construção (Reuters, 2024).

Em resumo, a aplicação do biochar na construção civil representa uma abordagem inovadora que alia sustentabilidade ambiental à melhoria do desempenho técnico dos materiais de construção. A continuidade das pesquisas e a padronização das práticas de produção e aplicação do biochar são essenciais para sua adoção ampla e eficaz no setor (Barbhuiya et al., 2024).

2.6.2 Necessidades de normalização e direcionamentos para pesquisas futuras

Para que o biochar seja amplamente adotado como material de construção, é crucial o desenvolvimento de normas técnicas e especificações (Barbhuiya et al., 2024; Senadheera et al., 2023). Atualmente, a ausência de padrões para a caracterização do biochar destinado ao uso em concreto, bem como para os métodos de ensaio e critérios de desempenho dos compósitos biochar-concreto, representa uma barreira significativa (Maljaee et al., 2021). Normas claras forneceriam aos engenheiros e construtores a confiança necessária para especificar e utilizar este material de forma segura e eficaz.

As pesquisas futuras devem se concentrar em diversos aspectos para preencher as lacunas de conhecimento existentes. É necessário aprofundar a compreensão da influência de diferentes tipos de biomassa e condições de pirólise nas propriedades do biochar e em seu desempenho no concreto, visando a produção de biochars "engenheirados" para aplicações específicas (Senadheera et al., 2023; Barbhuiya et al., 2024). Maljaee et al. (2021) sugerem mais estudos sobre a durabilidade de materiais cimentícios com biochar sob condições ambientais severas e a aplicação de biochar em matrizes cimento-cal para promover a carbonatação interna. Estudos de durabilidade a longo prazo em condições ambientais diversas (ataque de cloretos, sulfatos, ciclos de gelo-degelo, carbonatação acelerada) são fundamentais para validar a vida útil de concretos com biochar (Senadheera et al., 2023; Barbhuiya et al., 2024). Gupta et al. (2021) indicam a necessidade de investigar a influência da estrutura porosa do biochar na mitigação de danos por cristalização de sal. A otimização das dosagens de biochar como substituto de agregados miúdos e de cimento, e a investigação de seus efeitos combinados, continuam sendo áreas importantes. Adicionalmente, o desenvolvimento de modelos preditivos para o comportamento mecânico e de durabilidade, e a realização de mais estudos de caso e projetos piloto em escala real, contribuirão para a validação da tecnologia e sua transferência para o setor produtivo (Barbhuiya et al., 2024). A investigação aprofundada dos mecanismos de cura interna e do potencial de sequestro de carbono de forma quantitativa e verificável também são essenciais (Dixit et al., 2019; Barbhuiya et al., 2024).

Assim, ao considerar a introdução do biochar em formulações de concreto, não apenas se viabiliza uma inovação tecnológica, mas também se promove uma mudança de paradigma na forma como os materiais são selecionados, avaliados e utilizados na engenharia civil. A interseção entre desempenho técnico e responsabilidade ecológica consolida o biochar como uma das alternativas mais promissoras para o avanço da construção sustentável no século XXI (Barbhuiya et al., 2024; Mekky et al., 2024).

2.7 ESTUDOS DE CASO: BIOCHAR NA CONSTRUÇÃO CIVIL

A transição do biochar de uma solução experimental para uma aplicação prática na construção civil tem sido demonstrada por meio de projetos-piloto e estudos de caso desenvolvidos em diferentes partes do mundo. Essas iniciativas comprovam a viabilidade técnica e ambiental do uso do biochar como material complementar ou substitutivo em concretos, oferecendo uma base sólida para sua adoção em maior escala (Barbhuiya et al., 2024).

Na Austrália, pesquisadores da RMIT University aplicaram biochar derivado de resíduos de café (borra de café pirolisada) como substituto parcial da areia em concretos. Os resultados indicaram um aumento significativo na resistência à compressão – até 29,3% para uma substituição de 15% de areia por biochar produzido a 350°C – em comparação ao concreto convencional (Roychand et al., 2023). O estudo também destacou o potencial de redução da pegada de carbono do material ao transformar um resíduo orgânico em um componente construtivo valioso (Reuters, 2024; Roychand et al., 2023).

Estudos laboratoriais também fornecem casos importantes de investigação. Akhtar e Sarmah (2018) investigaram a substituição de cimento por biochar de cama de aviário, casca de arroz e lodo de papel e celulose (0,1% a 1% do volume total). Os resultados mostraram melhorias na resistência à flexão com biochar de cama de aviário e casca de arroz a 0,1%, e resistência à compressão próxima ao controle com 0,1% de biochar de lodo de papel. Similarmente, Tan et al. (2020) analisaram o efeito da temperatura de pirólise (400–700°C) de biochar de madeira (1-10% de substituição de cimento) em argamassas, observando que 1-3% de

adição otimizou a resistência, com o biochar de 500°C proporcionando os melhores resultados de compressão.

Adicionalmente, pesquisas conduzidas por Senadheera et al. (2023), em uma revisão abrangente de diversos estudos experimentais, demonstraram que o uso de biochar pode melhorar a resistência à penetração de íons cloreto, à carbonatação e, em alguns casos, ao ataque de sulfatos. Esses efeitos, combinados à capacidade do biochar de reter água e funcionar como agente de cura interna, podem resultar em concretos com maior durabilidade e vida útil estendida (Senadheera et al., 2023).

A aplicação prática do biochar não se limita à substituição de agregados. Em alguns estudos, como os revisados por Barbhuiya et al. (2024) e Maljaee et al. (2021), o biochar tem sido testado também como substituto parcial do cimento, especialmente quando suas cinzas possuem características pozolânicas ou quando o biochar é ativado quimicamente. Esta abordagem visa reduzir diretamente as emissões de CO₂ provenientes da fabricação de cimento Portland (Barbhuiya et al., 2024).

Esses exemplos confirmam que o uso do biochar é tecnicamente viável e ambientalmente vantajoso em diversas aplicações no concreto, desde que sejam respeitados critérios de formulação, caracterização do material e compatibilidade com os demais componentes. A padronização de protocolos experimentais e a criação de normas técnicas específicas são passos essenciais para que a indústria da construção possa incorporar essa inovação com segurança e eficiência (Barbhuiya et al., 2024).

Do ponto de vista econômico, a viabilidade da utilização do biochar no concreto depende de uma complexa interação de fatores, incluindo o custo de aquisição da biomassa, os custos de produção do biochar (energia para pirólise, mão de obra, equipamentos), o custo do transporte e os potenciais ganhos com a venda de subprodutos da pirólise (como bio-óleo e singás) (Barbhuiya et al., 2024). Akhtar e Sarmah (2018) realizaram uma análise econômica indicando que a substituição de pequenas frações de cimento por biochar poderia reduzir ligeiramente o custo do concreto, com custos de produção de biochar variando

entre USD 222 e USD 584 por tonelada, dependendo da escala. A substituição de cimento, um dos componentes mais caros do concreto, por biochar pode gerar economia direta de material (Gowri et al., 2024).

Gowri et al. (2024) relataram que o concreto com 20% de biochar substituindo cimento para pavimentos reduziu o custo do ciclo de vida em até 19%. Além disso, a valorização de resíduos de biomassa, que de outro modo teriam custos de descarte, transforma um passivo ambiental em um ativo econômico (Roychand et al., 2023). Mekky et al. (2024), ao compararem custos, observaram que a mistura com 5% de biochar de lodo de ETA tinha um custo de produção similar ao concreto convencional, mas com vantagens ambientais significativas. A longo prazo, benefícios econômicos podem surgir do aumento da vida útil das estruturas devido à melhoria da durabilidade e da redução da necessidade de manutenção corretiva, embora mais estudos de longo prazo sejam necessários para confirmar esses aspectos. A criação de um mercado para créditos de carbono associados ao uso de biochar em edificações também poderia adicionar um incentivo econômico (Barbhuiya et al., 2024).

2.8 BIOCHAR E O DESENVOLVIMENTO SUSTENTÁVEL NA CONSTRUÇÃO

A incorporação do biochar em matrizes cimentícias representa uma convergência significativa entre inovação tecnológica e responsabilidade ambiental no setor da construção civil (Maljaee et al., 2021). Os estudos revisados indicam que, além de promover o reaproveitamento de resíduos orgânicos e contribuir para o sequestro de carbono, o biochar pode atuar como um agente multifuncional dentro das formulações de concreto, influenciando propriedades como a resistência mecânica, a durabilidade e o controle da cura interna (Barbhuiya et al., 2024; Senadheera et al., 2023).

A variabilidade do biochar, que depende de fatores como tipo de biomassa e condições de pirólise, constitui um dos principais desafios para sua padronização e uso em larga escala (Senadheera et al., 2023; Barbhuiya et al., 2024). No entanto, essa mesma versatilidade permite sua adaptação a diferentes contextos e demandas da construção civil, desde que seja realizada uma caracterização técnica

rigorosa e um controle de qualidade eficaz (Barbhuiya et al., 2024). A adoção crescente do biochar em pesquisas e projetos-piloto reforça a necessidade de desenvolvimento de normas técnicas e protocolos de ensaio que consolidem seu uso como insumo sustentável.

No âmbito da sustentabilidade, o biochar oferece um caminho viável para reduzir a pegada de carbono da construção civil. Sua capacidade de armazenar carbono de forma estável, evitando sua liberação para a atmosfera (Lehmann; Joseph, 2009), aliada à possibilidade de substituir parcialmente materiais convencionais de alto impacto ambiental, como o cimento e os agregados naturais, posiciona o biochar como uma solução coerente com os Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ONU, 2015), em particular aqueles relacionados à ação climática (ODS 13), cidades e comunidades sustentáveis (ODS 11) e produção e consumo responsáveis (ODS 12) (Mekky et al., 2024).

Podemos entender que o biochar em si atua como um sumidouro de carbono, uma vez que o carbono contido na biomassa original é estabilizado durante o processo de pirólise e subsequentemente armazenado de forma duradoura na matriz cimentícia (Barbhuiya et al., 2024; Senadheera et al., 2023). Este mecanismo de sequestro de carbono contribui para a remoção de dióxido de carbono da atmosfera (Barbhuiya et al., 2024).

Adicionalmente, a incorporação de biochar no concreto pode permitir a redução do consumo de cimento Portland, seja por substituição direta de parte do aglomerante ou pela otimização da mistura que leve a um menor consumo geral de cimento para atingir o desempenho desejado (Barbhuiya et al., 2024). Considerando que a produção de cimento é uma das maiores fontes industriais de emissão de CO₂, respondendo por uma parcela considerável das emissões globais (Barbhuiya et al., 2024; Senadheera et al., 2023), qualquer redução no seu uso, facilitada pelo biochar, implica uma diminuição direta das emissões de GEE (Mekky et al., 2024). A substituição de agregados naturais por biochar também contribui, pois reduz a demanda por extração e processamento desses agregados, atividades que possuem sua própria pegada de carbono (De Bortoli, 2023).

Para uma compreensão integral da sustentabilidade do biochar no concreto, é

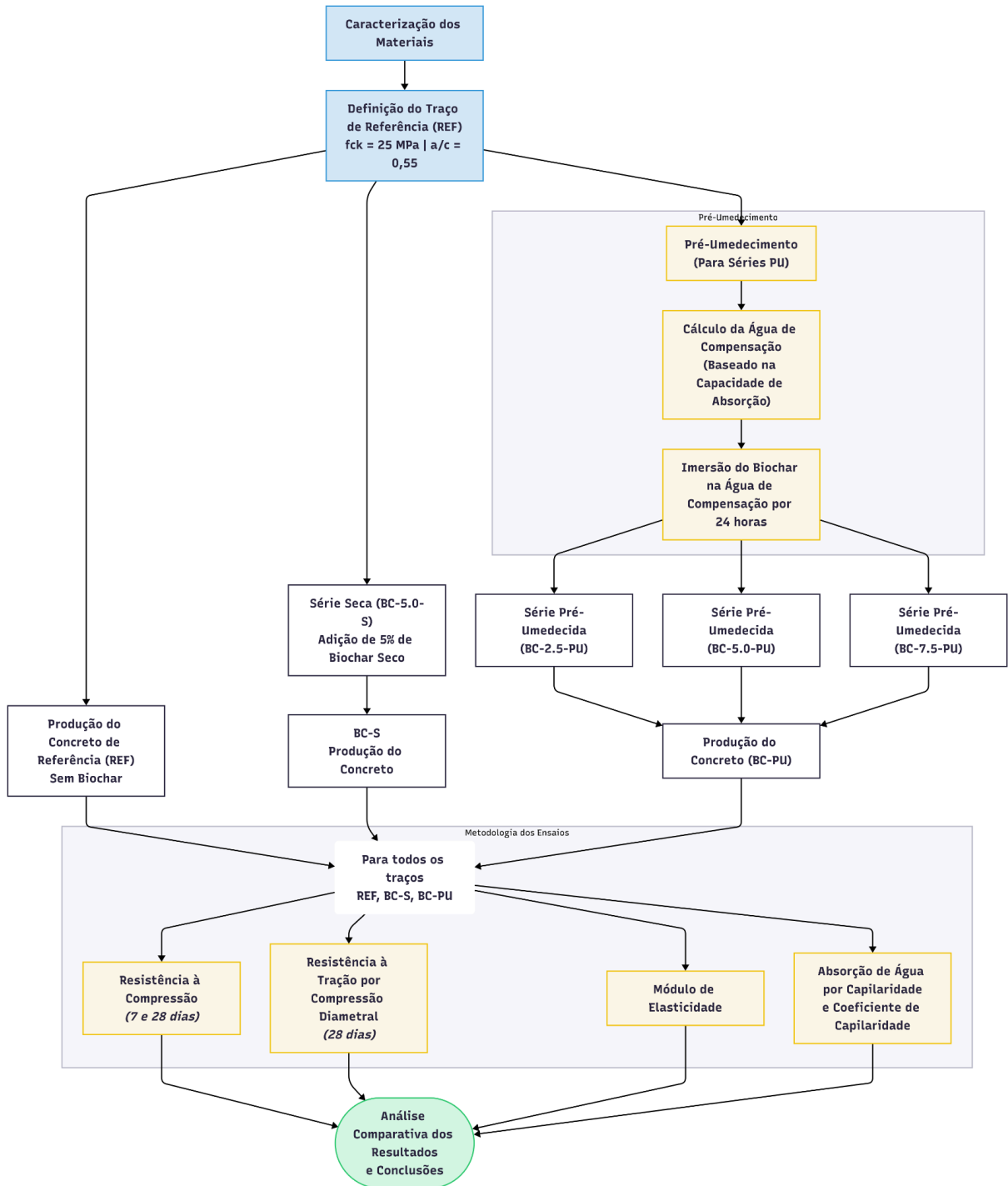
fundamental a Avaliação do Ciclo de Vida (ACV). A ACV quantifica os impactos ambientais associados a todas as etapas, desde a extração da biomassa e pirólise até o transporte e fim de vida da estrutura (Barbhuiya et al., 2024; Mekky et al., 2024). Estudos de ACV, como o de Mekky et al. (2024), demonstraram que um concreto com 5% de biochar de lodo de ETA como substituto parcial do cimento reduziu o Potencial de Aquecimento Global (GWP) em 32,2% comparado ao concreto convencional. Embora os resultados da ACV possam variar dependendo das fronteiras do sistema e distâncias de transporte, a literatura converge no fato de que o benefício ambiental preponderante advém da redução do consumo de cimento. Visto que a produção de clínquer é o processo de maior intensidade energética e carbônica na cadeia do concreto, sua substituição, mesmo que em pequenas proporções, atua como o principal driver para a mitigação das emissões de CO₂ e a viabilização de um material verdadeiramente sustentável (Barbhuiya et al., 2024; Mekky et al., 2024).

3 METODOLOGIA DE PESQUISA

Este capítulo apresenta o plano experimental desenvolvido para a avaliação sistemática dos efeitos da substituição parcial do cimento Portland por biochar nas propriedades do concreto. A metodologia foi estruturada para isolar e compreender os múltiplos mecanismos pelos quais o biochar interage com a matriz cimentícia, como o efeito de filler, o efeito de nucleação para hidratação e, crucialmente, o impacto de sua elevada absorção de água. Para tal, o programa abrange desde a seleção e caracterização rigorosa dos materiais constituintes até a execução de ensaios normatizados para as propriedades do compósito nos estados fresco e endurecido.

Os estudos de caracterização das propriedades dos concretos e a moldagem dos corpos de prova (CPs) foram realizados no Laboratório de Materiais de Construção Civil da Universidade de Caxias do Sul (UCS). O fluxograma de atividades pode ser visualizado na Figura 2.

Figura 2 – Fluxograma de atividades.



Fonte: O Autor (2025).

3.1 CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS

A seleção e a caracterização criteriosa dos materiais são etapas fundamentais que precedem a análise do compósito, pois as propriedades individuais de cada componente governam o comportamento do produto final.

3.1.1 Cimento Portland

Para a realização deste trabalho foi utilizado o Cimento Portland IV, classe de resistência 32 MPa (CP IV-32 RS), em conformidade com a ABNT NBR 16697:2018. A escolha deste aglomerante justifica-se por sua vasta aplicação na indústria da construção civil brasileira, o que confere maior relevância prática aos resultados. Na Tabela 2 estão apresentadas as especificações médias deste tipo de cimento.

Tabela 2 - Especificações médias do CP IV-32 RS.

Ensaio	Físicos e mecânicos									
	Finura (%)		Blaine (cm ² /g)	Água de consist. (%)	Tempo Pega		Expansib. a quente (mm)	Resist. à compressão (MPa)		
	#200	#325			Início (min)	Fim (min)		3 dias	7 dias	28 dias
Limites de Norma	≤ 8,0	N/A	N/A	N/A	≥ 60	≤ 600	≤ 5,0	≥ 10	≥ 20,0	≥ 32,0 ; ≤ 49,0
31/12/2021	0,5	3,1	5360	36	290	350	0	20,1	28,3	39
Média	0,6	3	4965	34,2	288,6	361,1	0	20,4	27,3	39,8
Desvio Padrão	0,16	0,42	427	1,58	10,99	19,92	0	0,82	1,72	0,99
Mínimo	0,3	2,2	4210	31,8	265	330	0	18,5	24,2	38,3
Máximo	0,9	3,6	5590	36	300	405	0	21,7	29,5	41,5

Fonte: Adaptado de Cimentos Votoram (2020, 2021); Cimento.org ([s.d.]).

3.1.2 Agregado Graúdo

A distribuição granulométrica dos agregados empregados na fabricação do concreto foi determinada através do ensaio de granulometria, em conformidade com a norma NBR 17054 (ABNT, 2022). O agregado, uma brita 1 de granito, com grãos

de formato arredondado e granulometria grossa, sendo adquirido de um fornecedor comercial local e cedido pela Universidade de Caxias do Sul, garantindo a padronização e a qualidade necessárias aos ensaios.

3.1.3 Agregado Miúdo - Areia Natural

O agregado miúdo utilizado neste estudo constitui-se de areia natural de origem quartzosa, adquirida no comércio local. Os ensaios de caracterização física foram realizados nos laboratórios da Universidade de Caxias do Sul (UCS), seguindo rigorosamente as prescrições das normas técnicas brasileiras.

A determinação da composição granulométrica foi executada em conformidade com a ABNT NBR 17054:2022 (Agregados - Determinação da composição granulométrica). O procedimento consistiu no peneiramento de duas amostras representativas, obtendo-se a média dos valores retidos para a caracterização final do material. Os resultados detalhados das frações granulométricas, bem como os índices físicos calculados, estão apresentados na Tabela 3.

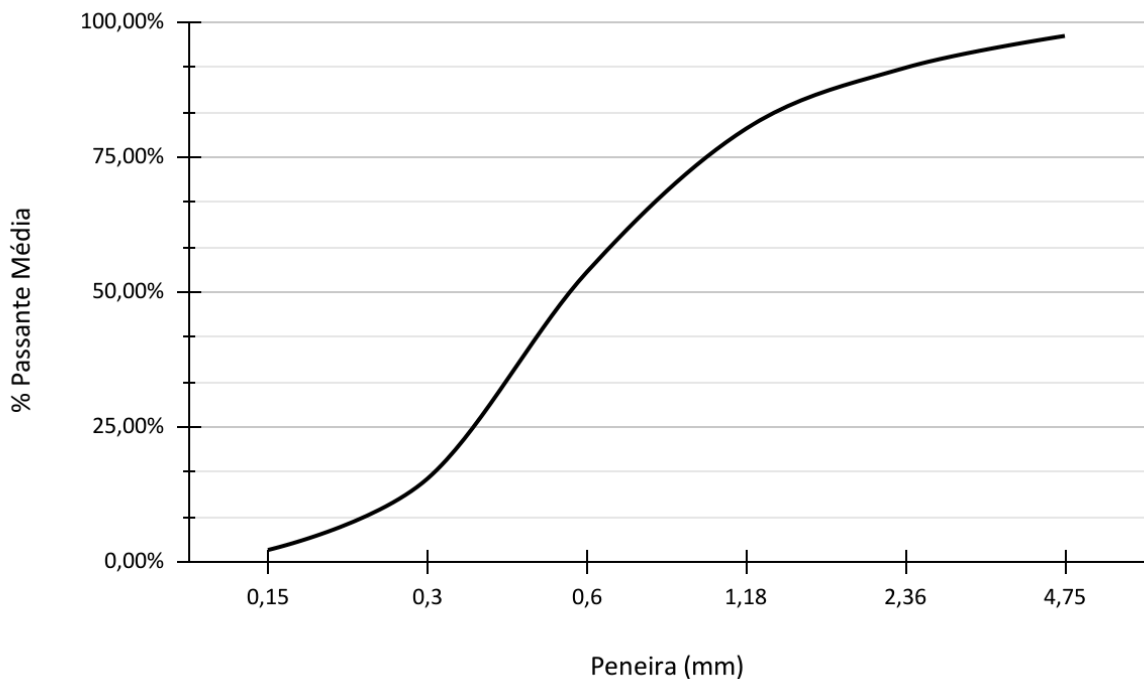
Tabela 3 - Composição granulométrica média do agregado miúdo.

Peneira (mm)	% Retida Individual (Média)	% Retida Acumulada (Média)	% Passante Média
4,75	2,45	2,5	97,50%
2,36	5,93	8,4	91,60%
1,18	11,3	19,7	80,30%
0,6	26,65	46,3	53,70%
0,3	38,23	84,6	15,40%
0,15	13,22	97,8	2,20%
< 0,15 (Fundo)	2,22	-	
Total	100,00%	-	
Módulo de Finura		2,59	
Dimensão Máx. (DMC)		4,75 mm	

Fonte: O Autor (2025).

Com base nos dados obtidos, determinou-se a Dimensão Máxima Característica (DMC) do agregado em 4,75 mm, visto que a porcentagem retida acumulada nesta peneira é inferior a 5%. O Módulo de Finura (MF) calculado foi de 2,59, o que classifica o material como areia média (Zona 2), segundo os parâmetros usuais de tecnologia do concreto. Este valor indica uma areia com distribuição equilibrada entre grãos finos e grossos, favorecendo a trabalhabilidade e a coesão da mistura. A distribuição das partículas pode ser melhor visualizada através da Curva Granulométrica apresentada na Figura 3.

Figura 3 – Curva granulométrica do agregado miúdo.



Fonte: O Autor (2025).

A análise da Figura 3 demonstra uma curva contínua e bem distribuída, sem descontinuidades bruscas (degraus), o que sugere um bom empacotamento das partículas. A continuidade da curva granulométrica é um fator positivo para a produção de concretos, pois contribui para a redução do volume de vazios e, conseqüentemente, para a otimização do consumo de pasta de cimento.

O Módulo de Finura (MF) calculado foi de 2,59 (média das amostras), o que classifica o agregado como areia média. Tais parâmetros são fundamentais para a dosagem experimental, influenciando diretamente o consumo de água e a trabalhabilidade do concreto no estado fresco.

3.1.4 Biochar: Seleção, Preparo e Caracterização

O biochar é o material central desta pesquisa. Sua influência no concreto depende diretamente de suas características físico-químicas, que são governadas pela matéria-prima de origem e, principalmente, pelas condições de pirólise (Lehmann; Joseph, 2009). A escolha da temperatura é crítica; temperaturas mais elevadas (>500°C) geralmente resultam em um biochar com maior teor de carbono fixo e maior estabilidade, porém podem alterar sua estrutura porosa e grupos funcionais superficiais (Maljaee et al., 2021). O estudo de Gupta e Kua (2019) demonstrou que o tamanho da partícula do biochar influencia diretamente a reologia da pasta e a cinética de hidratação, onde partículas mais finas promovem maior ganho de resistência inicial devido a um efeito de nucleação mais pronunciado.

Neste trabalho, foi utilizado um biochar comercial da empresa AgriFERT, incorporado às misturas em sua condição de fornecimento (*como recebido*), sem a aplicação de tratamentos térmicos ou químicos adicionais em laboratório. Quanto às características físicas, embora a determinação da curva granulométrica não tenha constado no escopo experimental, o material apresentava-se visualmente como um pó fino e homogêneo, previamente moído pelo fornecedor. Durante o manuseio, observou-se uma elevada pulverulência, com partículas leves tendendo à suspensão no ar, característica indicativa de uma granulometria fina que favorece a reatividade e a absorção, mas requer cuidados no manuseio. Como caracterização complementar para estabelecer um padrão, foi determinada a capacidade de absorção de água, a fim de estabelecer um padrão e entender melhor seu comportamento, sendo o ensaio detalhado abaixo:

- a) **Capacidade de Absorção de Água (24h):** A determinação da capacidade de absorção de água do biochar é um parâmetro crítico para a dosagem de concretos, especialmente quando se visa o mecanismo de cura interna.

Para a execução, de modo a garantir uma separação controlada entre as partículas de biochar saturado e o excesso de água livre, foi adotado o procedimento concebido como "método do saquinho de chá", detalhado por Gupta et al. (2018a). Este método consiste em imergir uma massa conhecida de biochar contida em um invólucro permeável e monitorar o ganho de massa até a saturação, corrigindo-se a massa do invólucro para obter a absorção efetiva do material. O procedimento ocorreu da seguinte maneira:

- Uma amostra de biochar foi seca em estufa até atingir massa constante, sendo então pesada para obter sua massa seca (M_s).
- A amostra seca foi então colocada em um recipiente permeável (como um "saquinho de chá" de material inerte) e imersa em água por um período de 24 horas para garantir sua completa saturação.
- Após o período de imersão, o excesso de água superficial foi removido e a massa da amostra saturada (M_{sat}) foi aferida.
- A capacidade de absorção de água (Ab) foi calculada, em porcentagem, pela seguinte equação:

$$Ab_{(\%)} = \frac{M_{sat} - M_s}{M_s} \times 100 \quad (1)$$

Onde:

$Ab_{(\%)}$ = Capacidade de Absorção de água (%)

M_{sat} = Massa da amostra na condição saturada (g)

M_s = Massa da amostra seca em estufa a (105 ± 5) °C por 24 horas (g).

3.2 DELINEAMENTO EXPERIMENTAL E DOSAGEM DOS CONCRETOS

Nesta seção, são apresentados os detalhes do programa experimental desenvolvido para atingir os objetivos do estudo. Descreve-se o traço de concreto de referência (REF) utilizado como controle e, a partir dele, a formulação dos traços experimentais. O delineamento foi estruturado para avaliar a influência de duas variáveis principais: os diferentes teores de substituição de cimento por biochar

(2,5%, 5,0% e 7,5%) e os métodos de adição do material (seco vs. pré-umedecido), sendo que apenas o teor de substituição de 5% foi realizado com e sem o pré-umedecimento.

3.2.1 Traço de Referência e Dosagem

A dosagem do concreto se baseou no método do IPT/EPUSP, projetando-se um traço de referência (REF) para atender a uma classe de resistência C25 ($f_{ck,proj} = 25$ MPa) e uma consistência de plástica a mole, definida por um abatimento de cone de (160 ± 200) mm. Inicialmente, a relação água/cimento (a/c) foi estabelecida em 0,55. Os consumos de materiais para o traço REF serviram como base para todos os traços experimentais, sendo demonstrados na Tabela 4.

Tabela 4 – Traço de Referência (REF) por m³ de Concreto

Material	Consumo (kg/m ³)	Proporção (massa)
Cimento CP II-F-32	380,0	1,00
Areia (seca)	798,0	2,10
Brita 1 (seca)	1026,0	2,70
Água efetiva	209,0	0,55
Relação a/c	-	0,55

Fonte: O Autor (2025).

3.2.2 Pré-umedecimento e Cálculo da Água de Compensação

A incorporação do biochar em compósitos cimentícios apresenta um desafio metodológico: sua estrutura altamente porosa e de elevada área superficial causa uma absorção imediata de parte da água de amassamento quando adicionado em sua condição seca (Gupta et al. 2018b; Maljaee et al., 2021; Senadheera et al., 2023). Embora essa capacidade de retenção seja o mecanismo fundamental que possibilita a cura interna (pelo efeito reservatório de liberação posterior), a absorção não compensada na fase inicial impacta negativamente a trabalhabilidade da mistura

fresca, resultando em uma mistura mais rígida (Gupta et al., 2018) e, mais criticamente, reduz a quantidade de água efetivamente disponível para as reações de hidratação do cimento (Dixit et al., 2019), podendo comprometer o desenvolvimento das propriedades mecânicas.

Para neutralizar este efeito e permitir uma análise clara dos benefícios do biochar, adota-se a estratégia do pré-umedecimento (Dixit et al., 2019; Maljaee et al., 2021). Este procedimento consiste em saturar os poros do biochar com uma massa de água pré-determinada, aqui denominada "água de compensação", antes de sua introdução na betoneira (Barbhuiya et al., 2024; Dixit et al., 2019). A quantidade desta água é calculada estequiometricamente a partir do ensaio de capacidade de absorção do biochar (Dixit et al., 2019; Gupta et al., 2018). Ao satisfazer previamente a demanda hídrica do material, garante-se que a relação água/cimento efetiva do traço seja preservada, permitindo que a hidratação do cimento ocorra conforme o planejado e que o biochar atue como um reservatório de umidade para a cura interna (Dixit et al., 2019; Maljaee et al., 2021).

Esta abordagem metodológica possibilita o estudo de dois mecanismos benéficos do biochar. O primeiro é a cura interna, no qual a água de compensação, agora sequestrada nos poros do biochar, é liberada gradualmente para a pasta de cimento ao longo do tempo, promovendo uma hidratação mais completa e contínua (Gupta; Kua, 2018). O segundo é o efeito de nucleação, onde as finas partículas de biochar atuam como sítios para a precipitação e crescimento dos produtos de hidratação do cimento (C-S-H), podendo otimizar a microestrutura do compósito (Dixit et al., 2019; Gupta et al., 2021).

Este método, fundamentado no princípio da cura interna já conhecido para agregados leves, foi investigado e validado para o biochar nos trabalhos de Barbhuiya et al. (2024) que avaliou o método aplicado com sucesso por Dixit et al. (2019) em concretos de alto desempenho.

O processo de pré-umedecimento, conforme descrito no estudo de Dixit et al. (2019), envolve os seguintes passos:

a) **Cálculo da capacidade de absorção da água:** A quantidade de água

calculada (Água de Compensação) é usada para a imersão. Isso implica que a quantidade de água não é aleatória, mas sim calculada para um propósito específico.

- b) **Período de Imersão:** O biochar é deixado de molho nesta quantidade calculada de água por um período de 24 horas.
- c) **Incorporação na Mistura:** Após as 24 horas, o biochar pré-umedecido, juntamente com a água em que foi imerso, é adicionado diretamente aos outros ingredientes secos da mistura de concreto (cimento, agregados).

É fundamental esclarecer que a água de compensação é adicionada ao sistema como um volume suplementar e não deve ser descontada da água de amassamento (água efetiva). Sua função é exclusivamente saturar a porosidade interna do biochar, equalizando sua umidade para impedir a sucção capilar da água livre da mistura. Dessa forma, assume-se que a água de compensação permanece retida nos poros do agregado leve e não participa da reologia inicial da pasta, garantindo que a relação água/cimento (a/c) efetiva de projeto permaneça inalterada.

Para exemplificar a aplicação do método, demonstra-se a seguir um exemplo do cálculo para o traço BC-5.0-PU (substituição de 5% de cimento), utilizando-se a Equação (1), detalhada no item 3.1.4, e também as informações de traços detalhadas na Tabela 6 no item 3.2.3.

- **Massa de Cimento a ser Substituída:** $9,35 \text{ kg} \times 5\% = 0,492 \text{ kg}$
- **Massa de Biochar a ser Adicionada:** $M_{\text{biochar}} = 0,492 \text{ kg}$
- **Água de Compensação Necessária:** $M_{\text{agua_comp}} = 0,492 \text{ kg} \times 2,014 = 0,991 \text{ kg}$
- **Água Total na Mistura:** $5,41 \text{ (água efetiva)} + 0,991 \text{ (água de compensação)} = 6,401 \text{ kg}$

A estratégia de pré-umedecer o biochar com a exata massa de água de compensação visa neutralizar este efeito adverso. Ao realizar este procedimento, a demanda hídrica do material é satisfeita previamente, garantindo que a relação água/cimento efetiva do traço — parâmetro que governa as propriedades do concreto endurecido — seja mantida conforme o planejado. Desta forma, a água de compensação não atua como água livre na mistura fresca, mas fica sequestrada na

estrutura porosa do biochar, que, por sua vez, atuará posteriormente como um agente de cura interna, liberando esta água gradualmente para promover uma hidratação mais completa do cimento.

Tabela 5 - Cálculo da Capacidade de Absorção de água (%) do biochar.

Saco	Massa saco vazio (g)	Ms (g) biochar seco em estufa	Massa conjunto saturado (24h)	Absorção média saco (g)	Absorção de água biochar(g)	Msat (g)	Ab(%)
S1	3,90	20,10	69,88	5,88	40,00	60,10	199,02
S2	3,90	20,12	70,80	5,88	40,90	61,02	203,30
S3	3,90	20,03	70,20	5,88	40,39	60,42	201,67
S4	3,90	20,05	71,30	5,88	41,47	61,52	206,85
S5	3,78	20,05	69,60	5,70	40,07	60,12	199,87
S6	3,78	20,09	69,28	5,70	39,71	59,80	197,68

Fonte: O Autor (2025).

3.2.3 Definição e Composição dos Traços Experimentais

O programa foi desenhado para responder a duas questões centrais: o impacto da absorção de água e o efeito da dosagem. Para o desenvolvimento dos concretos utilizados neste estudo, foram estabelecidas diferentes séries com a incorporação de biochar, buscando investigar o impacto de sua adição na mistura. A Tabela 6 detalha as composições em massa (kg/m^3) para cada série, incluindo uma série de referência (REF) sem biochar, uma série seca (Série Seca) e três séries pré-umedecidas (Série Pré-Umedecida - PU) com diferentes teores de biochar.

Tabela 6 - Composições em massa (kg/m^3) das séries de concreto.

Traço	Substituição de Cimento (%)	Cimento (kg)	Biochar (kg)	Areia (seca) (kg)	Brita 1 (seca) (kg)	Água (kg)	Água Compensação (kg)
REF	0,00%	9,84	0,000	20,67	26,58	5,41	0,000
BC-5.0-S	5,00%	9,35	0,492	20,67	26,58	5,41	0,000
BC-2.5-PU	2,50%	9,60	0,246	20,67	26,58	5,41	0,496
BC-5.0-PU	5,00%	9,35	0,492	20,67	26,58	5,41	0,991
BC-7.5-PU	7,50%	9,11	0,738	20,67	26,58	5,41	1,487

Fonte: O Autor (2025).

É fundamental esclarecer a metodologia para as séries pré-umedecidas (PU): a "Água de Compensação" listada na tabela não é um volume de água adicionado separadamente na mistura. Ela corresponde à massa de água que é absorvida pelo biochar durante o processo de pré-umedecimento para atingir a condição saturada. Portanto, o componente introduzido na betoneira é o biochar já úmido, garantindo que apenas a "Água Efetiva" seja adicionada como água livre.

3.2.3.1 Análise das Composições

- a) **Cimento CP IV-32 RS:** A quantidade de cimento será ajustada em algumas séries em função do teor de biochar adicionado. A série REF utiliza 380,0 kg/m³, enquanto as séries com biochar apresentam pequenas variações, quanto maior o teor de biochar substituído, proporcionalmente, menor o teor de cimento. O cimento CP IV-32 RS é um cimento Portland composto, com adição de filler, amplamente utilizado em concretos estruturais devido às suas propriedades.
- b) **Biochar Série Seca (BC-5.0-S):** Contém 19,0 kg/m³ de biochar, correspondendo a 5% em massa do cimento inicial. Esta série visa analisar o comportamento do biochar adicionado sem pré-umedecimento.
- c) **Biochar Série Pré-Umedecida (PU):** Compreende três variações:
 - BC-2.5-PU: 9,5 kg/m³ de biochar (2,5% em massa do cimento inicial).
 - BC-5.0-PU: 19,0 kg/m³ de biochar (5% em massa do cimento inicial).
 - BC-7.5-PU: 28,5 kg/m³ de biochar (7,5% em massa do cimento inicial).

O pré-umedecimento do biochar é uma estratégia fundamental para mitigar sua alta capacidade de absorção de água, que poderia comprometer a relação água/cimento efetiva e a trabalhabilidade do concreto fresco. O pré-umedecimento do biochar é a estratégia fundamental para mitigar sua alta capacidade de absorção de água. O procedimento, conforme detalhado na Seção 3.2.2, consiste em saturar o biochar por 24 horas com uma quantidade de água de compensação pré-calculada. Esta abordagem garante que a relação água/cimento efetiva e a trabalhabilidade do concreto fresco não sejam comprometidas.

- d) **Areia e Brita 1:** As quantidades de areia ($798,0 \text{ kg/m}^3$) e brita 1 ($1026,0 \text{ kg/m}^3$) serão mantidas constantes em todas as séries. Isso garante que a granulometria dos agregados não seja uma variável interferente na comparação entre as diferentes misturas, permitindo que as alterações nas propriedades do concreto sejam atribuídas principalmente à presença e ao tratamento do biochar.
- e) **Água Efetiva (a):** A quantidade de água efetiva ($209,0 \text{ kg/m}^3$) será fixada para todas as séries. A água efetiva refere-se à porção da água total que participa das reações de hidratação do cimento e contribui para a fluidez da mistura.
- f) **Água de Compensação (b):** Este parâmetro é crucial para as séries pré-umedecidas. Nas séries REF e Seca, a água de compensação é $0,0 \text{ kg/m}^3$. No entanto, para as séries PU, a água de compensação precisará ser calculada. Essa água adicional tem como objetivo saturar os poros do biochar antes de sua incorporação à mistura, evitando que o biochar absorva a água da mistura de concreto e, conseqüentemente, altere a relação água/cimento e a trabalhabilidade. O cálculo da água de compensação dependerá da capacidade de absorção de água de cada tipo e teor de biochar utilizado.
- g) **Água Total (a+b):** A água total é a soma da água efetiva e da água de compensação. Para as séries REF e Seca, a água total é igual à água efetiva ($209,0 \text{ kg/m}^3$). Para as séries PU, a água total será maior, incorporando a água necessária para o pré-umedecimento do biochar. Ressalta-se, contudo, que esse acréscimo não representa uma alteração na relação água/cimento de projeto, uma vez que a água de compensação permanece retida nos poros do agregado (efeito reservatório) e não se mistura à pasta de cimento durante a fase fresca, não influenciando, portanto, a porosidade da matriz cimentícia.

A metodologia de dosagem e a preparação dessas misturas são etapas críticas para o sucesso do estudo, assegurando que as propriedades do concreto sejam diretamente influenciadas pela adição de biochar e pelo seu pré-umedecimento. A análise dos resultados de resistência mecânica, durabilidade e outras propriedades desses concretos permitirá avaliar o potencial do biochar como um material inovador na indústria da construção civil.

3.3 METODOLOGIA DOS ENSAIOS

O concreto investigado neste estudo será submetido a ensaios que visam caracterizar suas propriedades no estado endurecido, garantindo a conformidade com os requisitos de desempenho para aplicações estruturais e não estruturais. Para tal, serão observadas as especificações da ABNT NBR 7680:2015, que estabelece os requisitos e métodos de ensaio para o concreto endurecido, abrangendo aspectos como a determinação da absorção de água, e as resistências à compressão e à tração na flexão. Estes ensaios são cruciais para a verificação das propriedades mecânicas e físicas do concreto após o período de cura estabelecido.

Em relação ao uso do biochar, é fundamental destacar que a escolha da biomassa precursora e as condições de pirólise, especialmente a faixa de temperatura, exercem influência significativa nas propriedades finais do biocarvão. Desse modo, a produção do biochar deve ser cuidadosamente planejada para se alinhar à finalidade específica de seu emprego no concreto. Um ponto crítico a ser considerado durante o processo de dosagem, ao adicionar biochar em compostos cimentícios, é a sua elevada capacidade de absorção de água. O biochar pode absorver parte da água de amassamento, reduzindo a trabalhabilidade da mistura fresca. Para mitigar esse efeito, técnicas como o pré-umedecimento do biochar ou o ajuste na dosagem de aditivos superplastificantes são comumente empregadas, visando preservar a trabalhabilidade desejada sem comprometer a relação água/cimento efetiva e, conseqüentemente, as propriedades do concreto endurecido.

3.3.1 Procedimento de Mistura

A mistura será realizada em betoneira de eixo vertical. A sequência e os tempos serão rigorosamente controlados para garantir a homogeneidade e repetibilidade:

- a) **Pré-umedecimento (Apenas para a série PU):** Em um recipiente separado,

a massa de biochar será misturada com sua respectiva água de compensação. A mistura será feita até homogeneizar em forma de uma pasta, sendo deixada em repouso por 60 minutos.

- b) **Mistura dos Agregados Graúdos e Água Inicial:** Adicionou-se o agregado graúdo e 50% da água efetiva à betoneira, misturando durante 1 minuto.
- c) **Adição dos Aglomerantes:** Com a betoneira em movimento, os aglomerantes (cimento + biochar) foram adicionados, sendo o biochar seco para a série S, ou a pasta de biochar pré-umedecida para a série PU. A mistura foi feita durante 2 minutos.
- d) **Mistura dos Agregados Miúdos e Água Residual:** Adicionou-se o agregado miúdo (areia) e o restante da água efetiva (50%) e mantendo a betoneira em operação por mais 3 minutos.

3.3.2 Ensaio de Abatimento do Tronco de Cone (Estado Fresco)

A trabalhabilidade é uma propriedade fundamental do concreto fresco. A adição de materiais finos e porosos como o biochar tende a alterar drasticamente a reologia da mistura. Este ensaio quantifica essa alteração, sendo o primeiro indicador do efeito da absorção de água do biochar.

Para avaliar a consistência e a trabalhabilidade do concreto fresco, será realizado o ensaio de abatimento do tronco de cone, em conformidade com as diretrizes da ABNT NBR NM 67:1998. Este teste consiste em preencher um molde tronco-cônico com a mistura de concreto em três camadas, sendo cada uma delas cuidadosamente adensada com 25 golpes, utilizando uma haste metálica padronizada para assegurar a uniformidade da amostra e a eliminação de vazios. Após o adensamento, o molde é retirado verticalmente de forma lenta e controlada, permitindo que o concreto sofra um abatimento em sua altura. A diferença de altura entre o topo do molde inicial e o ponto mais alto do concreto abatido é então medida, proporcionando um índice direto da consistência e da trabalhabilidade da mistura fresca.

A literatura corrobora que a adição de biochar, devido à sua natureza porosa e capacidade de absorção de água, tende a influenciar a trabalhabilidade das misturas cimentícias. Estudos prévios demonstram essa variabilidade: em concretos,

o *slump* pode variar de 180 mm (para o controle) a 100 mm com 20% de biochar de lodo de ETA (Mekky et al., 2024); ou de 55 mm (controle) a 40 mm com 20% de substituição de cimento por biochar em pavimentos (Gowri et al., 2024). Para argamassas, o *flow* de controle pode ser de 135 mm (Gupta et al., 2018a), reduzindo para até 109 mm com 8% de biochar (Gupta et al., 2018a), ou de 206 mm (Tan et al., 2020) para 133 mm (Tan et al., 2020) com 10% de biochar. Essa tendência de redução do abatimento com o aumento da porcentagem de biochar é amplamente observada.

Para o presente estudo, buscou-se uma consistência plástica, com um abatimento alvo de 160 mm. Este valor se encontra na transição entre as classes S100 (100 mm a 160 mm) e S160 (160 mm a 220 mm), conforme a ABNT NBR 8953:2015.

Figura 4 – Aferição do abatimento do concreto.



Fonte: O Autor (2025).

3.3.3 Moldagem e Cura dos Corpos de Prova

Para a moldagem das amostras cilíndricas, com 20 cm de altura e 10 cm de diâmetro, o procedimento de adensamento seguiu a NBR 5738 (2015), aplicando 12

golpes de haste de socamento em cada uma das duas camadas de igual espessura. Os corpos de prova moldados podem ser vistos na Figura 5.

Após a desforma (Figura 6) as amostras se mantiveram submersas em tanque com água (Figura 7), conforme especificado pela NBR 5738 (ABNT, 2015), até atingir as idades de 7 e 28 dias definidas para a realização dos ensaios.

Figura 5 – Corpos de prova moldados.



Fonte: O Autor (2025).

Figura 6 – Corpos de prova desformados.



Fonte: O Autor (2025).

Figura 7 – Corpos de prova no tanque para cura.



Fonte: O Autor (2025).

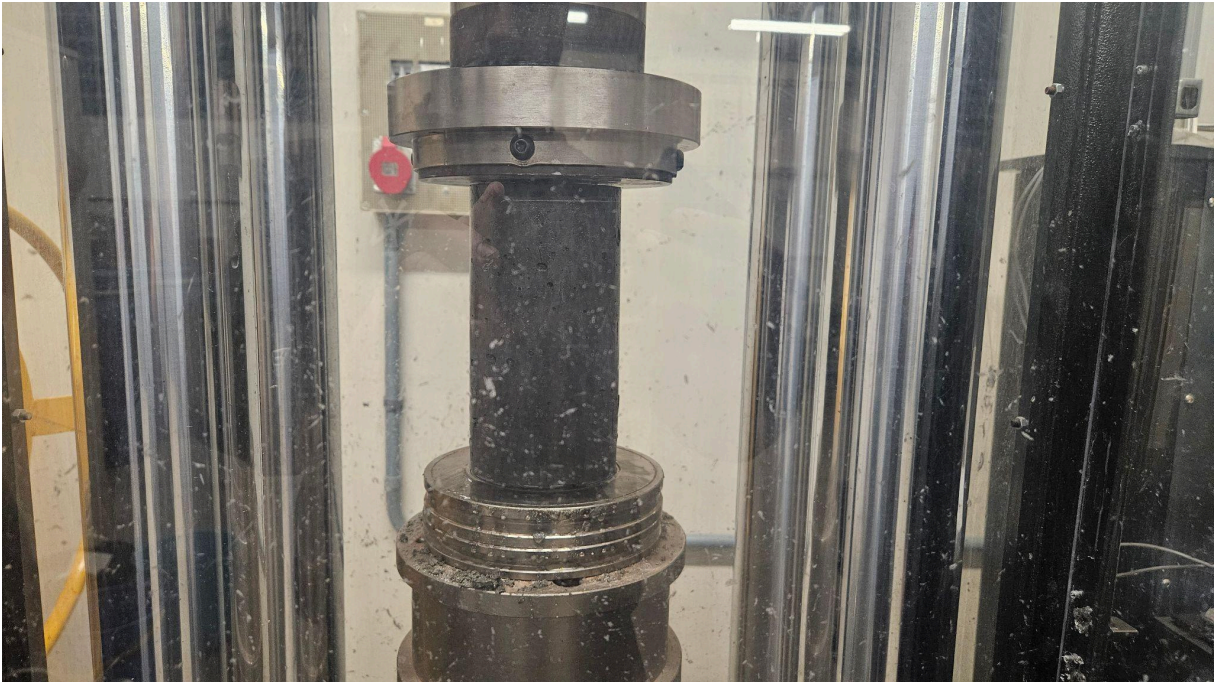
3.3.4 Resistência à Compressão Axial

A Resistência à Compressão Axial é a principal propriedade mecânica do concreto. A adição de biochar pode influenciá-la por múltiplos fatores: efeito de diluição (negativo), efeito de filler (positivo) e efeito de nucleação (positivo) (Gupta; Kua, 2018).

A NBR 5739 (ABNT, 2018) especifica o ensaio de resistência à compressão do concreto, que envolve a moldagem de corpos de prova cilíndricos (10 cm de diâmetro por 20 cm de altura) e um período de cura mínimo de 28 dias em condições controladas.

Para este trabalho, as amostras de concreto serão ensaiadas aos 7 e 28 dias. Após a cura, os corpos de prova serão centralizados entre placas planas no equipamento de ensaio e submetidos a uma carga gradual até a falha. A carga aplicada e a deformação do concreto serão registradas, identificando-se o ponto de ruptura quando não houve aumento significativo da carga com o incremento da deformação. A resistência à compressão é calculada dividindo a carga máxima pela área da seção transversal do corpo de prova. Esse procedimento é crucial para determinar a capacidade do concreto de resistir a esforços compressivos, sendo uma prática essencial na engenharia civil. A Figura 8 ilustra o rompimento dos CPs por compressão.

Figura 8 – Corpo de prova em processo de rompimento.



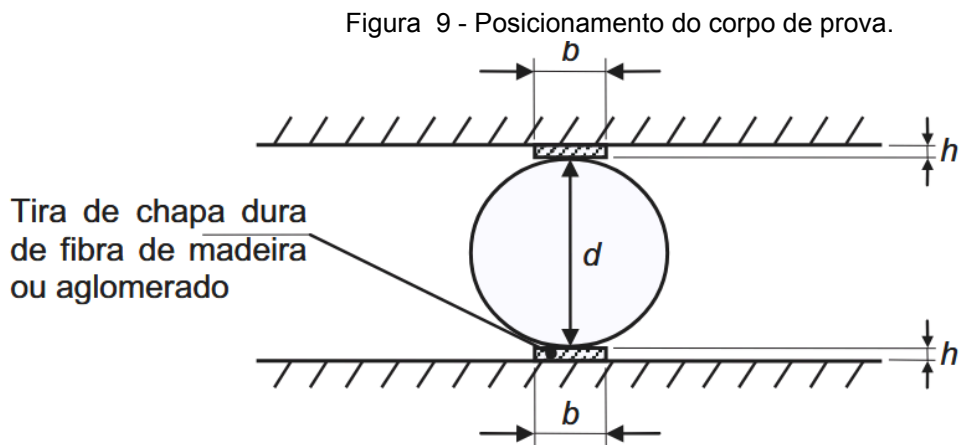
Fonte: O Autor (2025).

3.3.5 Resistência à Tração por Compressão Diametral

A Resistência à Tração por Compressão Diametral, também conhecida como Ensaio Brasileiro (*Brazilian Test*), indica a capacidade do material de resistir a esforços de tração, sendo fundamental para o controle da fissuração. Adições de micropartículas como o biochar podem influenciar a tenacidade da matriz (Cosentino et al., 2019). O ensaio, conforme a NBR 7222 (ABNT, 2011), envolve a moldagem de corpos de prova cilíndricos. Estes são curados por no mínimo 28 dias sob temperatura e umidade controladas.

Após a cura, os corpos de prova são submetidos a uma máquina de ensaio universal, seguindo as especificações da norma. Uma carga de compressão é aplicada ao longo do diâmetro do cilindro até a sua ruptura, registrando-se a carga máxima aplicada. A resistência à tração é então calculada com base na carga máxima suportada e nas dimensões do corpo de prova. Este ensaio (Figura 9) é

essencial para avaliar a capacidade do concreto de resistir a tensões de tração, oferecendo dados cruciais sobre a coesão e a fragilidade do material.



Fonte: NBR 7222, 2011.

3.3.6 Módulo de Elasticidade Estático

O Módulo de Elasticidade Estático é uma propriedade mecânica fundamental que descreve a rigidez do concreto e sua capacidade de deformar-se elasticamente sob a aplicação de carga. Este parâmetro é crucial para o projeto estrutural e a análise do comportamento do material em serviço, afetando principalmente as deformações. A adição de biochar, especialmente em dosagens mais elevadas, pode influenciar a rigidez do concreto, tornando a determinação do Módulo de Elasticidade essencial para quantificar essa influência.

O ensaio para determinação do módulo de elasticidade estático será realizado em corpos de prova cilíndricos (10 cm x 20 cm) aos 28 dias de idade, em conformidade com as diretrizes da ABNT NBR 8522:2017. O procedimento consiste em aplicar uma carga compressiva axial gradual ao corpo de prova, enquanto as deformações axiais são medidas por meio de um extensômetro fixado à sua superfície. O módulo de elasticidade é então calculado pela relação entre a tensão aplicada e a deformação correspondente, dentro do limite de proporcionalidade do material. Estudos prévios indicam que o biochar pode influenciar o módulo de elasticidade, sendo essa avaliação necessária para compreender o impacto na deformabilidade do concreto.

3.3.7 Absorção de Água por Capilaridade e Coeficiente de Capilaridade

Este ensaio tem como objetivo determinar a absorção de água por capilaridade e o coeficiente de capilaridade dos concretos endurecidos. Trata-se de um indicador-chave da durabilidade do material, pois avalia a penetração de água na rede de poros acessíveis por sucção capilar, que é o principal mecanismo de transporte de agentes agressivos (como cloretos e sulfatos) para o interior do concreto. No contexto deste trabalho, o ensaio de capilaridade é fundamental para avaliar indiretamente a eficácia da cura interna promovida pelo biochar pré-umidificado (Série PU).

A hipótese é que a cura interna proporciona uma hidratação mais completa do cimento, refinando a microestrutura e reduzindo a conectividade dos poros capilares. Espera-se, portanto, que os traços da Série PU apresentem uma menor absorção de água por capilaridade em comparação com o traço de Referência (REF) e com o traço de biochar seco (Série S), indicando uma matriz mais densa e, conseqüentemente, mais durável.

O ensaio foi realizado aos 28 dias de idade, seguindo os princípios metodológicos da ABNT NBR 15259:20052 e foram utilizados três corpos de prova cilíndricos (10 cm de diâmetro por 20 cm de altura) para a obtenção de um valor médio. O procedimento consistiu em:

- a. **Preparação:** Corpos de prova serão secos em estufa até atingirem massa constante.
- b. **Medição Inicial:** A massa inicial de cada corpo de prova seco m_s foi determinada.
- c. **Execução:** Os corpos de prova foram posicionados sobre suportes dentro de um recipiente com nível de água constante, de forma que apenas a face inferior fique submersa a uma profundidade de (5 ± 1) mm.
- d. **Medições:** A massa dos corpos de prova foi registrada aos 10 minutos (m_{10})

e aos 90 minutos (m_{90}) após o contato inicial com a água. Antes de cada pesagem, a superfície do corpo de prova foi rapidamente enxugada com um pano úmido.

e. **Cálculos:** Com os dados obtidos, foram calculados:

A absorção de água por capilaridade (A_t) em cada tempo será calculada pela Equação (2), e o coeficiente de capilaridade (C) será calculado pela Equação (3), conforme prescrito pela norma:

- Absorção de água por capilaridade em cada tempo (A_t):

$$A_t = \frac{m_t - m_0}{A} \times 100 \quad (2)$$

Onde:

A_t = absorção de água por capilaridade no tempo t (g/cm²)

m_t = massa do corpo de prova no tempo t (g)

m_0 = massa inicial do corpo de prova seco (g)

A = área da face do corpo de prova em contato com a água (cm²)

- Coeficiente de capilaridade (C):

$$C = \frac{(m_{90} - m_{10}) \times 100}{\sqrt{90} - \sqrt{10}} \quad (3)$$

Onde:

C = coeficiente de capilaridade (g/dm² × min^{1/2})

m_{90} = massa do corpo de prova aos 90 min (g)

m_{10} = massa do corpo de prova aos 10 min (g)

O fator 100 é adicionado à fórmula original da norma (que foi simplificada) para ajustar a unidade da área de cm^2 (usada no cálculo de A_t) para dm^2 , conforme exigido pela unidade do coeficiente.

3.3.8 Avaliação da Cura Interna

A capacidade de cura interna do concreto é um mecanismo relevante, especialmente em misturas com baixa relação água/cimento ou na presença de aditivos porosos como o biochar. A cura interna ocorre quando a água, previamente absorvida e retida pelo biochar, é gradualmente liberada para a matriz cimentícia, auxiliando na hidratação contínua do cimento mesmo após o período inicial de cura externa. Este fenômeno contribui para a redução de fissuras por retração autóloga e pode, potencialmente, aumentar a durabilidade do concreto.

Para avaliar a efetividade da cura interna promovida pelo biochar neste trabalho, serão analisados e discutidos comparativamente diversos indicadores indiretos, confrontando os resultados obtidos para os traços contendo biochar pré-umidecido (Série PU) com os do traço de referência (REF) e do traço com biochar seco (BC-S). As principais abordagens para inferir a ocorrência e os benefícios da cura interna serão:

a. **Análise Comparativa das Propriedades Mecânicas em Idades Avançadas:**

- **Hipótese:** Se a cura interna for efetiva, ela promoverá uma hidratação mais completa do cimento ao longo do tempo, resultando em uma microestrutura potencialmente mais densa e resistente em idades mais avançadas (e.g., 28 dias, 35 dias ou mais).
- **Avaliação:** Será realizada uma comparação da evolução da resistência à compressão (e/ou outras propriedades mecânicas como módulo de elasticidade ou resistência à tração na flexão, se disponíveis) entre os traços PU, REF e BC-S. Um ganho de resistência

relativamente maior nos traços PU em idades mais avançadas, em comparação com o traço REF (que pode ter sua hidratação limitada pela disponibilidade de água) ou com o traço BC-S (onde o biochar pode ter absorvido água de amassamento), pode ser um forte indicativo da contribuição positiva da cura interna. É importante notar, contudo, que o próprio biochar pode atuar como um ponto fraco, então a análise deve considerar o balanço entre a melhoria da matriz e a inclusão do material.

3.3.9 Apresentação dos resultados

Os dados obtidos na realização dos ensaios laboratoriais serão primeiramente compilados e organizados em planilhas eletrônicas para processamento. A apresentação dos resultados será feita, predominantemente, por meio de gráficos de colunas, permitindo uma comparação visual direta entre o desempenho do traço de referência (REF) e os traços com substituição de biochar (Séries Seca e Pré-Umedecida).

Para garantir a representatividade estatística dos dados, os valores plotados nos gráficos corresponderão à média aritmética dos resultados individuais obtidos para cada série.

Adicionalmente, nos ensaios onde foram utilizados três ou mais corpos de prova por idade (como na resistência à compressão axial e resistência à tração por compressão diametral), será calculado e apresentado o desvio padrão amostral. Este parâmetro será representado nos gráficos através de barras de erro verticais sobre as colunas de média, indicando a dispersão dos resultados e a confiabilidade da amostra ensaiada. Essa abordagem permite avaliar não apenas o valor absoluto da propriedade, mas também a homogeneidade e a consistência da mistura de concreto produzida.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

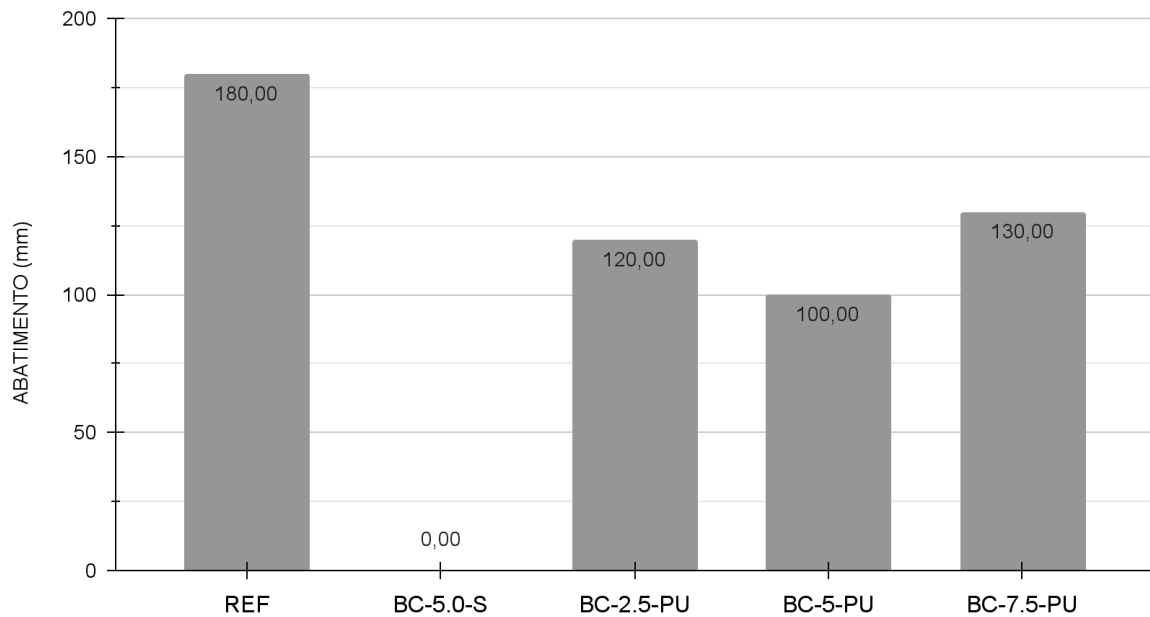
Este capítulo detalha os resultados de ensaios com as seguintes formulações de concreto: uma de referência, uma com substituição seca de cimento por biochar e outras três com substituição de biochar pré-umedecido em diferentes teores. A pesquisa avaliou a resistência à compressão axial e à tração na compressão diametral, o módulo de elasticidade, a absorção de água por capilaridade e a cura interna para quantificar o impacto do biochar nas propriedades do concreto. O objetivo é compreender como essa alternativa sustentável afeta o desempenho mecânico e a funcionalidade hidráulica, comparando os benefícios e desafios do biochar seco e pré-umedecido no desenvolvimento de concretos mais ecológicos e eficientes.

4.1 TRABALHABILIDADE DAS MISTURAS NO ESTADO FRESCO

A avaliação da trabalhabilidade, realizada através do ensaio de abatimento do tronco de cone, evidenciou o impacto crítico do método de adição do biochar na reologia do concreto.

Inicialmente, mantendo-se a relação água/cimento (a/c) efetiva fixa em 0,55 para todos os traços, observou-se uma disparidade significativa nos resultados, conforme apresentado na Figura 10. O traço de Referência (REF) atingiu um abatimento de 180 mm, dentro do esperado. Em contraste, a série Seca (BC-5.0-S), onde o biochar foi adicionado sem pré-umedecimento, apresentou perda total de fluidez, registrando um abatimento nulo (0 mm).

Figura 10 - Comparativo do abatimento dos corpos de prova com a água efetiva.



Fonte: O Autor (2025).

Este comportamento do traço seco corrobora as observações da literatura, confirmando que a estrutura porosa do biochar, com sua elevada capacidade de absorção, retém instantaneamente a água de mistura, reduzindo drasticamente a água livre disponível para a lubrificação dos agregados (Senadheera et al., 2023; Barbhuiya et al., 2024). Por outro lado, as séries Pré-Umedecidas (PU) demonstraram a eficácia da saturação prévia. Conforme a Figura 10, os traços PU apresentaram abatimentos iniciais entre 100 mm e 130 mm, indicando que o pré-umedecimento neutralizou a absorção imediata, preservando a reologia da pasta.

Para equalizar a consistência de todas as misturas no intervalo alvo, foi necessária a adição de água suplementar (água de ajuste). A Tabela 7 detalha as quantidades de água e as relações a/c finais resultantes.

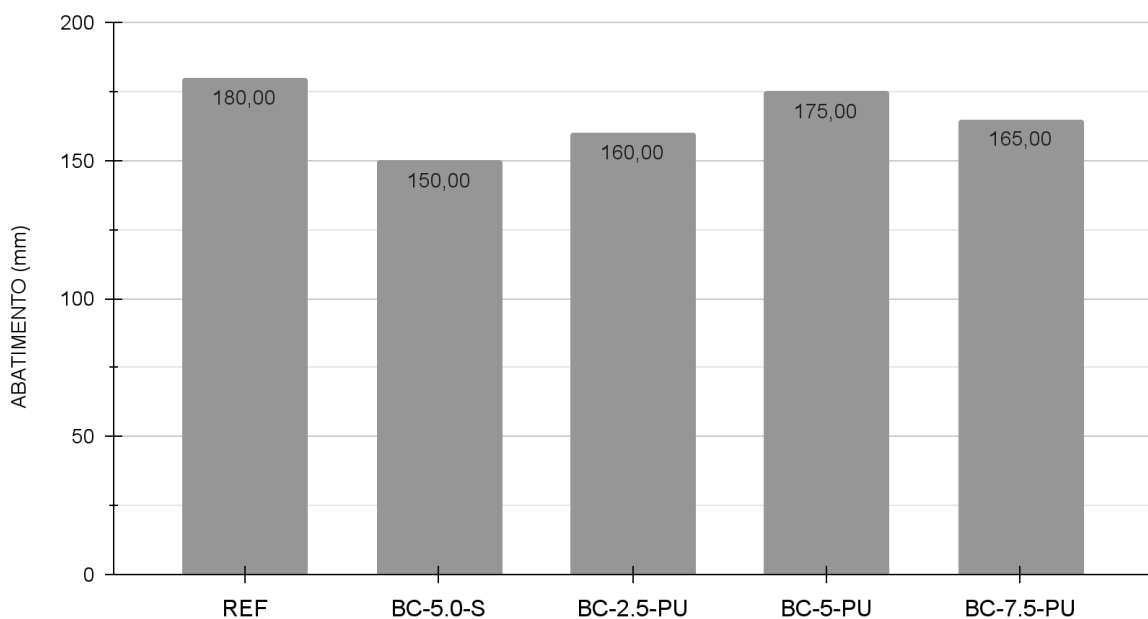
Tabela 7 – Relação água/aglomerante após ajuste no *slump test*.

Traço	Substituição de Cimento (%)	Cimento (kg)	Biochar (kg)	Água (kg)	Água de Ajuste (kg)	Água Compensação (kg)	Água Total (kg)	Relação água/aglomerante (a/c+b)
REF	0,00%	9,84	0,000	5,41	0,000	0,000	5,41	0,55
BC-5.0-S	5,00%	9,35	0,492	5,41	1,340	0,000	6,75	0,69
BC-2.5-PU	2,50%	9,60	0,246	5,41	0,146	0,496	6,05	0,56
BC-5.0-PU	5,00%	9,35	0,492	5,41	0,274	0,991	6,68	0,58
BC-7.5-PU	7,50%	9,11	0,738	5,41	0,087	1,487	6,98	0,56

Fonte: O Autor (2025).

Nota-se na Tabela 7 que a série BC-5.0-S exigiu uma quantidade significativa de água de ajuste (1,340 kg), elevando a relação água/aglomerante total para 0,69. Já as séries PU exigiram ajustes mínimos, mantendo a relação a/c efetiva controlada entre 0,56 e 0,58. Os resultados finais de abatimento após o ajuste são apresentados na Figura 11.

Figura 11 - Comparativo do abatimento dos corpos de prova com a água de ajuste.



Fonte: O Autor (2025).

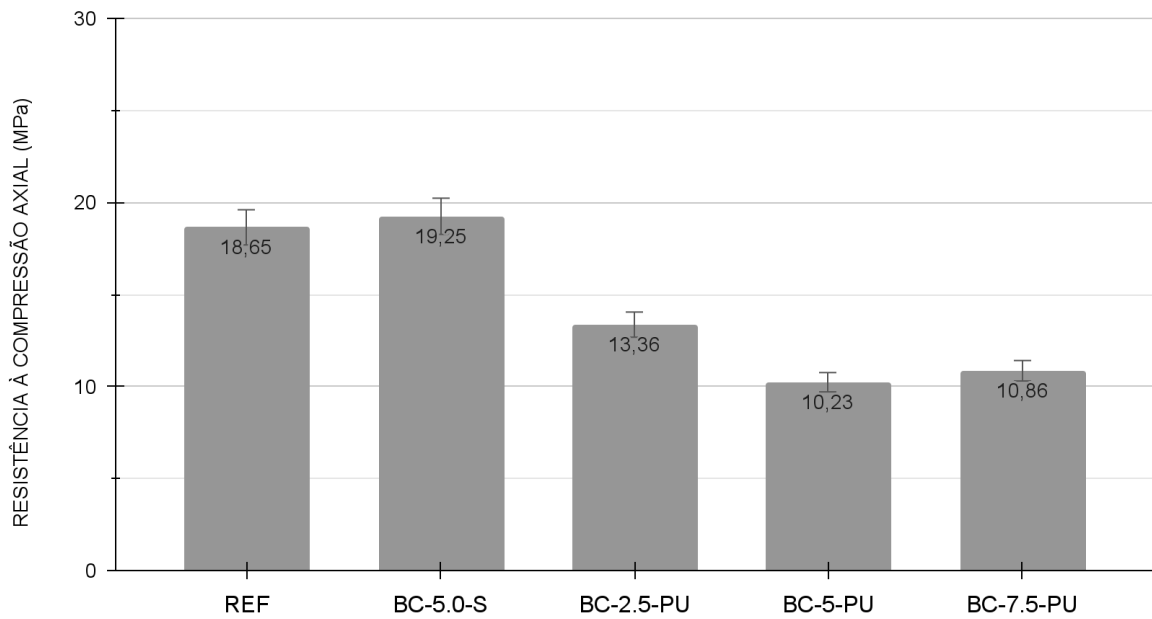
A análise comparativa entre os métodos, visualizada na Figura 11 e nos dados de consumo de água, valida a metodologia proposta por Dixit et al. (2019) como essencial. O pré-umedecimento (Série PU) mostrou-se a abordagem técnica mais adequada neste estudo para manter o controle reológico em compósitos cimentícios com biochar, evitando alterações drásticas na relação água/cimento.

Alternativamente ao método de pré-umedecimento adotado neste estudo, a literatura técnica aponta o uso de aditivos químicos como uma solução viável para mitigar a perda de fluidez causada pela alta absorção do biochar sem comprometer a relação água/cimento. Dixit et al. (2019), por exemplo, empregaram um superplastificante à base de policarboxilato para controlar a reologia de concretos de ultra-alto desempenho, reportando a necessidade de aumentar a dosagem do aditivo de 0,50% para 1,50% em misturas com teores mais elevados de biochar (8%) a fim de evitar a rigidez excessiva da pasta. Corroborando essa estratégia, Mekky et al. (2024) incorporaram sistematicamente um superplastificante comercial (Sika ViscoCrete) na proporção fixa de 1,5% sobre a massa do aglomerante em todos os traços contendo biochar de lodo de alumínio, assegurando a manutenção da trabalhabilidade normativa sem a necessidade de incrementar a água de amassamento.

4.2 RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO AXIAL

Os resultados de resistência à compressão axial revelam uma interação complexa entre o efeito de cura interna e o efeito de substituição do cimento. A evolução da resistência aos 7 dias pode ser observada na Figura 12.

Figura 12 - Comparativo de resistência à compressão axial dos corpos de prova aos 7 dias.

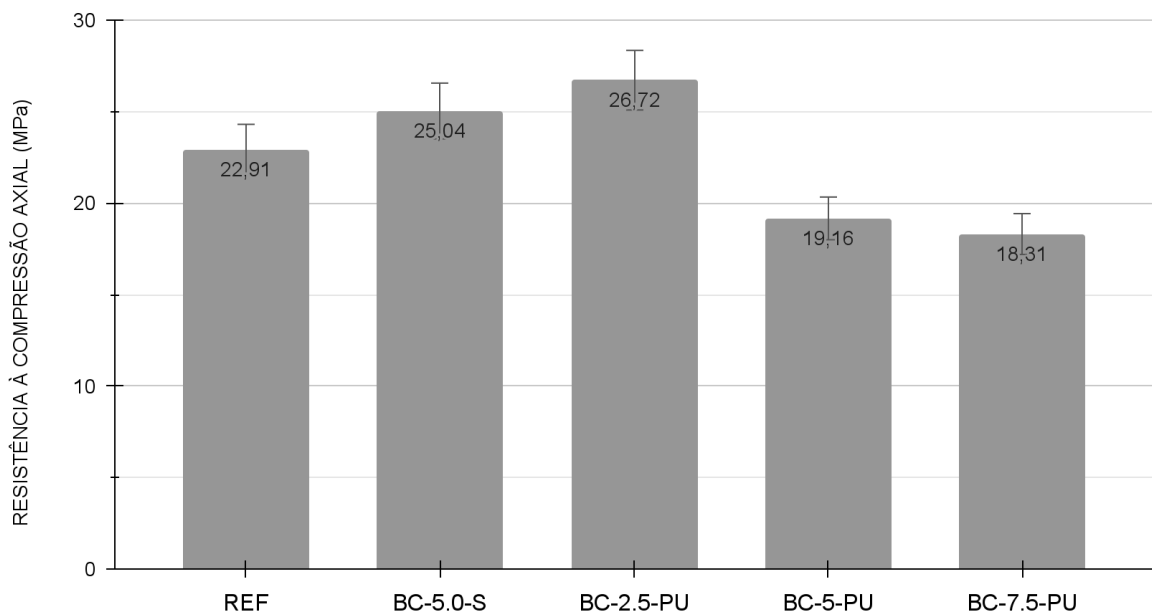


Fonte: O Autor (2025).

Aos 7 dias, conforme a Figura 12, observou-se uma queda de resistência nas séries PU em comparação ao traço REF (18,65 MPa). Este comportamento inicial é atribuído ao fato de o biochar atuar como uma inclusão menos rígida na matriz antes que os benefícios da cura interna se manifestem plenamente.

No entanto, aos 28 dias, o cenário se alterou positivamente para as dosagens pré-umedecidas, conforme demonstrado na Figura 13.

Figura 13 - Comparativo de resistência à compressão axial dos corpos de prova aos 28 dias.

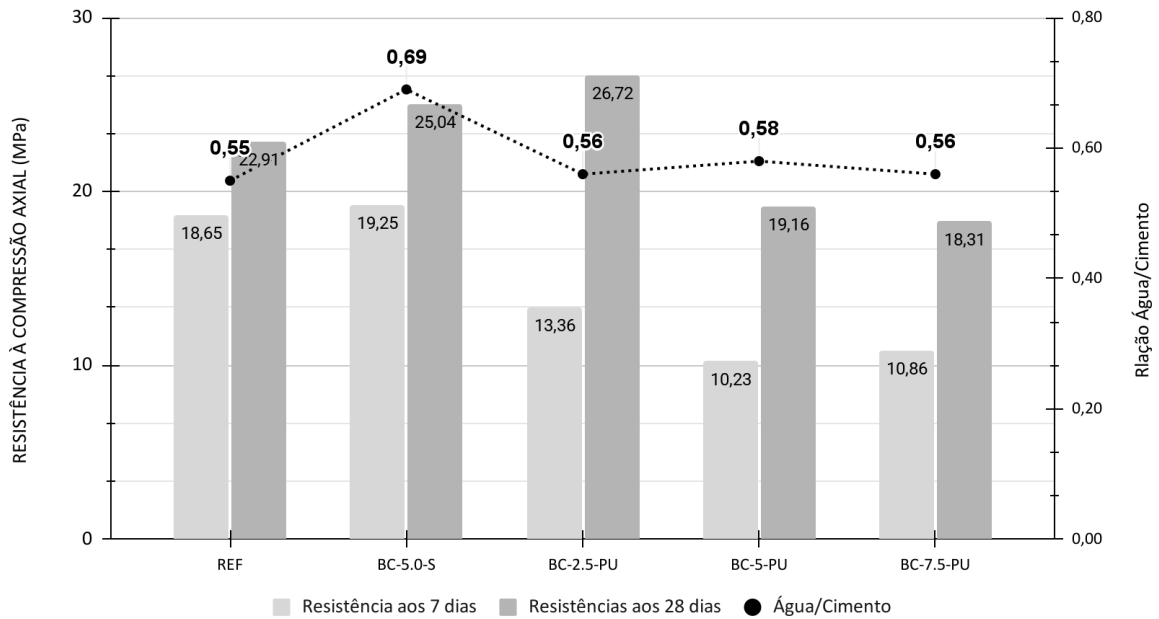


Fonte: O Autor (2025).

A análise da Figura 13 destaca que o traço BC-2.5-PU atingiu a maior resistência média do estudo (26,72 MPa), superando o traço de referência REF (22,91 MPa) em aproximadamente 16,6%. O traço BC-5.0-S (Série Seca) também apresentou desempenho superior ao REF (25,04 MPa). Contudo, observa-se que para as séries PU com maiores teores de substituição (5.0% e 7.5%), a resistência caiu para 19,16 MPa e 18,31 MPa, respectivamente, indicando que acima de um certo teor, o biochar passa a atuar predominantemente como um defeito na matriz (Gupta et al., 2021).

Para compreender a eficiência desses resultados, foi realizada uma análise correlacionando a resistência obtida com a relação água/cimento efetiva demandada por cada traço, apresentada na Figura 14.

Figura 14 - Correlação entre resistência à compressão e a relação água/cimento utilizada.



Fonte: O Autor (2025).

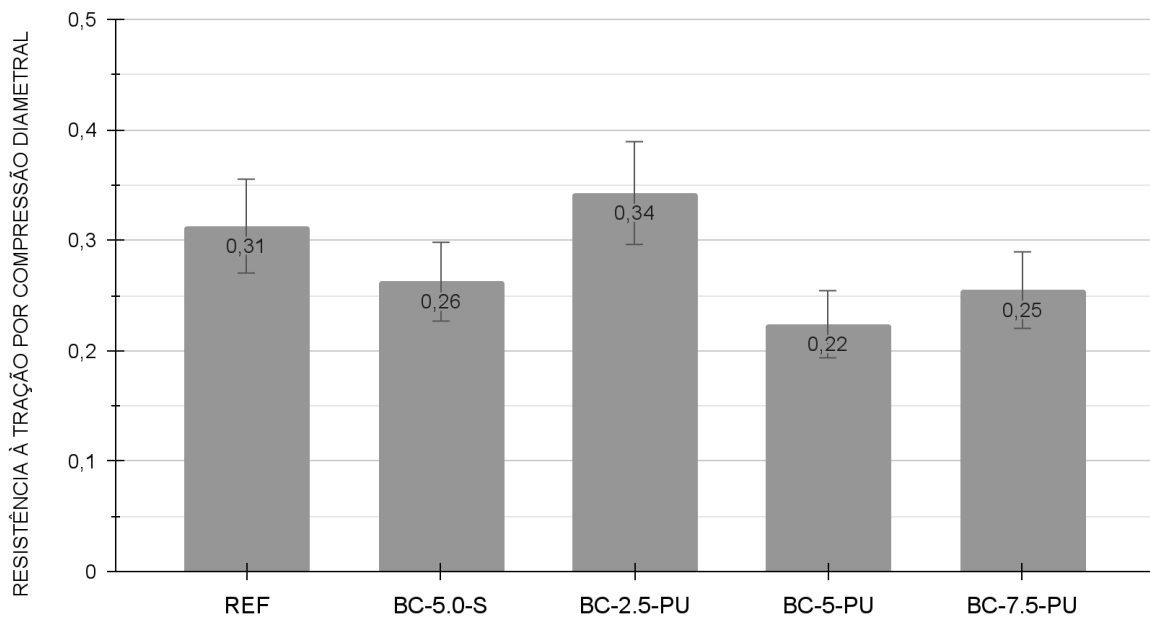
A Figura 14 revela o impacto da metodologia de adição. A linha pontilhada (eixo secundário) evidencia que, no traço BC-5.0-S, a elevada resistência foi alcançada mesmo com uma relação água/aglomerante total superior (0,69), consequência da absorção de água pelo biochar seco durante a mistura. Isso indica que, embora o compósito apresente bom desempenho mecânico devido à cura interna, a metodologia seca resulta em um consumo de água significativamente maior para a obtenção da trabalhabilidade.

Em contraste, o traço BC-2.5-PU destaca-se pela alta eficiência: obteve a resistência máxima do estudo mantendo a relação a/c (vale na linha pontilhada) muito próxima à do concreto de referência. Isso comprova que a cura interna controlada (pré-umedecimento) em baixas dosagens permite maximizar a hidratação do cimento sem introduzir excesso de água na mistura, resultando em uma matriz densa e mecanicamente superior, conforme teorizado por Gupta e Kua (2018).

4.3 RESISTÊNCIA À TRAÇÃO POR COMPRESSÃO DIAMETRAL

Os resultados de resistência à tração por compressão diametral aos 28 dias, apresentados na Figura 15, acompanharam a tendência observada na compressão, destacando o desempenho do traço com menor teor de substituição.

Figura 15 - Comparativo de resistência à compressão diametral dos corpos de prova.



Fonte: O Autor (2025).

Conforme ilustrado na Figura 15, o traço BC-2.5-PU obteve a maior resistência à tração média (0,34 MPa), superando o traço REF (0,31 MPa). Este resultado é significativo, pois a resistência à tração é altamente sensível à qualidade da Zona de Transição Interfacial (ZTI). O aumento sugere que, nesta dosagem, a cura interna proporcionada pelo biochar densificou a microestrutura da pasta ao redor das partículas, melhorando a aderência interfacial.

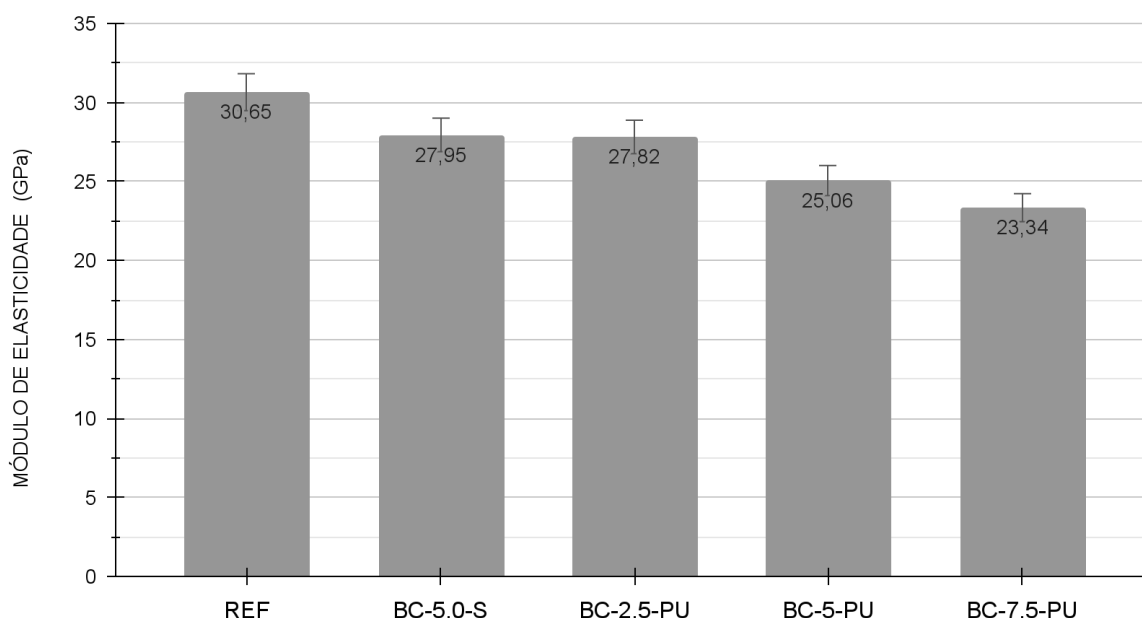
Por outro lado, os traços BC-5.0-PU (0,22 MPa) e BC-7.5-PU (0,25 MPa), bem como o BC-5.0-S (0,26 MPa), apresentaram desempenho inferior ao de referência. Nesses casos, a presença de um volume maior de partículas de biochar

— que possuem baixa resistência intrínseca à tração e podem gerar microfissuras na interface (Dixit et al., 2019) — atuou como fator limitante.

4.4 MÓDULO DE ELASTICIDADE ESTÁTICO

O Módulo de Elasticidade Estático apresentou uma redução progressiva com a incorporação de biochar, conforme demonstrado na Figura 16.

Figura 16 - Comparativo do módulo de elasticidade dos corpos de prova aos 28 dias.



Fonte: O Autor (2025).

O concreto de referência (REF) exibiu o maior módulo (30,65 GPa). Entre os concretos com biochar, observa-se na Figura 16 que o traço BC-5.0-S e o BC-2.5-PU apresentaram valores próximos (27,95 GPa e 27,82 GPa, respectivamente), representando uma redução de cerca de 9% em relação ao REF. Os traços com maiores teores de biochar (5.0-PU e 7.5-PU) apresentaram reduções mais acentuadas.

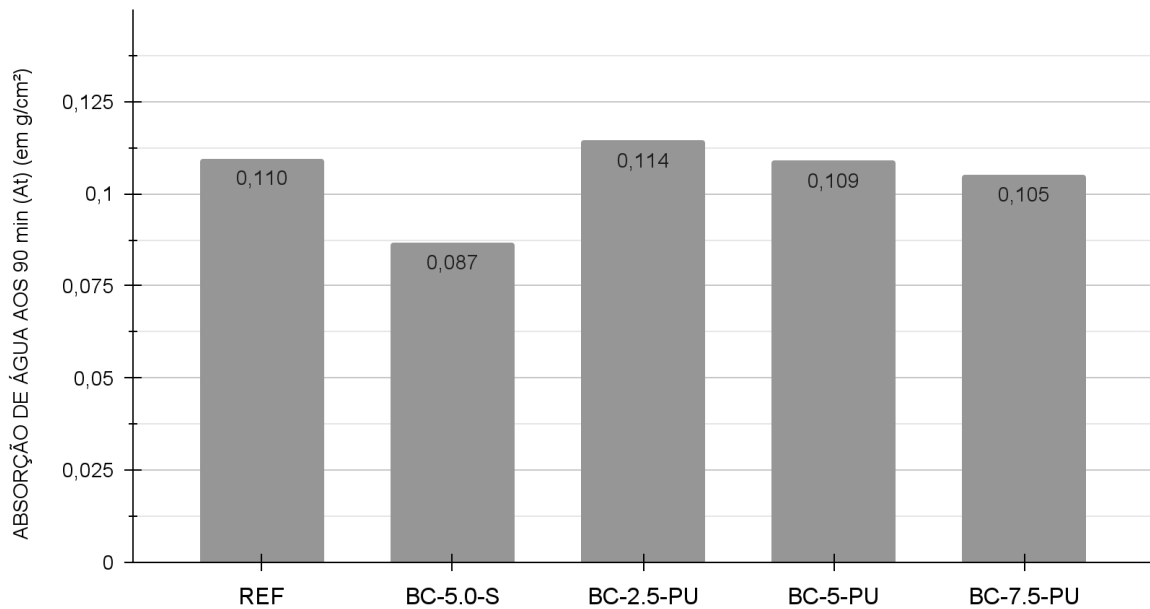
Este comportamento é esperado e documentado na literatura (Dixit et al., 2019; Senadheera et al., 2023). O biochar é um material carbonáceo poroso com um

módulo de elasticidade intrínseco significativamente menor (aprox. 8 GPa) do que o da matriz de cimento e dos agregados pétreos. Portanto, sua inclusão reduz a rigidez global do compósito, tornando o material ligeiramente mais deformável.

4.5 ABSORÇÃO DE ÁGUA POR CAPILARIDADE

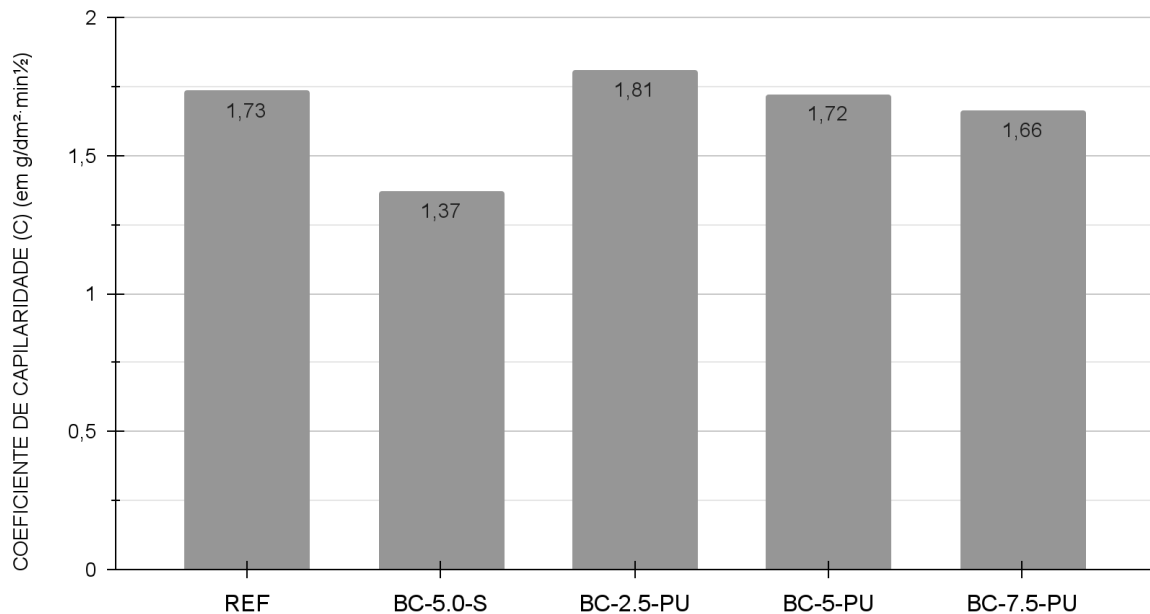
Os ensaios de durabilidade, avaliados pela absorção de água por capilaridade, demonstraram a eficácia do biochar no refinamento da rede de poros. A Figura 17 apresenta a absorção acumulada de água (A_t) e a Figura 18 apresenta o coeficiente de capilaridade (C).

Figura 17 - Comparativo da absorção de água por capilaridade (A_t) dos corpos de prova.



Fonte: O Autor (2025).

Figura 18 - Comparativo do coeficiente de capilaridade (C) dos corpos de prova.



Fonte: O Autor (2025).

Conforme a Figura 18, o traço BC-5.0-S apresentou o menor Coeficiente de Capilaridade (C) ($1,37 \text{ g/dm}^2 \cdot \text{min}^{1/2}$), uma redução de 20,8% em relação ao traço REF ($1,73 \text{ g/dm}^2 \cdot \text{min}^{1/2}$). Isso confirma que a liberação da água absorvida pelo biochar durante a mistura promoveu uma hidratação mais avançada, bloqueando os poros capilares.

Nas séries pré-umedecidas, observa-se que o traço BC-7.5-PU ($1,66 \text{ g/dm}^2 \cdot \text{min}^{1/2}$) também mostrou desempenho ligeiramente superior ao REF. O traço BC-2.5-PU apresentou coeficiente ($1,81 \text{ g/dm}^2 \cdot \text{min}^{1/2}$) estatisticamente comparável ao de referência. Em termos de absorção acumulada aos 90 min (A_t) mostrada na Figura 17, o traço BC-5.0-S apresentou o menor valor ($0,087 \text{ g/cm}^2$), significativamente inferior ao REF ($0,110 \text{ g/cm}^2$). Estes resultados indicam que a cura interna promovida pelo biochar pode melhorar a durabilidade do concreto ao reduzir a taxa de penetração de água.

5 CONCLUSÃO

Este trabalho avaliou a influência da substituição parcial de cimento Portland por biochar em concretos, analisando diferentes teores (2,5%, 5,0% e 7,5%) e métodos de adição (seco e pré-umedecido), sendo que a série seca contemplou apenas a substituição de 5%. Com base nos resultados experimentais e nas análises realizadas, as conclusões são apresentadas a seguir:

Quanto ao desenvolvimento dos traços e métodos de adição, conclui-se que a metodologia de pré-umedecimento (Série PU) é a abordagem técnica mais adequada para o controle tecnológico do concreto. Ela permitiu manter a relação água/aglomerante efetiva próxima à do traço de referência (0,56-0,58), isolando o efeito do biochar. Em contraste, a adição de biochar seco (Série S - 5%) exigiu um ajuste excessivo de água (a/c total = 0,69) para compensar a absorção imediata do material, alterando a composição da pasta.

Em relação à trabalhabilidade, observou-se que o biochar seco tem um impacto deletério severo, anulando o abatimento do concreto (0 mm) se não houver compensação de água. O biochar pré-umedecido, por sua vez, mitigou esse efeito, garantindo uma consistência plástica adequada (abatimento > 100 mm) sem a necessidade de alterar drasticamente a quantidade de água de amassamento, validando a importância da saturação prévia dos poros do agregado leve.

No que tange ao desempenho mecânico (compressão e tração), identificou-se um teor ótimo de substituição. O traço com 2,5% de biochar pré-umedecido (BC-2.5-PU) apresentou o melhor desempenho global, superando o concreto de referência em resistência à compressão (26,72 MPa vs 22,91 MPa) e tração diametral (0,34 MPa vs 0,31 MPa) aos 28 dias. Isso indica que, em baixas dosagens, o efeito benéfico da cura interna supera o efeito de enfraquecimento causado pela inclusão de um material menos resistente. Dosagens superiores (5% e 7,5% na série PU) resultaram em queda de resistência, sugerindo que o excesso de biochar introduz defeitos na matriz que a cura interna não é capaz de compensar. O traço seco (BC-5.0-S) também superou o traço referência, provando que a cura interna

pode compensar até mesmo uma alta relação a/c, embora com menor controle tecnológico.

Sobre o módulo de elasticidade, conclui-se que a incorporação de biochar reduz a rigidez do concreto. Todos os traços com biochar apresentaram módulo de elasticidade inferior ao traço de referência (redução entre 9% e 24%). Isso confirma que as partículas de biochar, sendo mais porosas e menos rígidas que o cimento hidratado e os agregados, atuam como inclusões deformáveis na matriz, o que deve ser considerado em projetos que dependam da rigidez estrutural.

Quanto à avaliação da cura interna e durabilidade (capilaridade), os resultados comprovaram a eficácia do biochar como agente de cura interna. O traço BC-5.0-S apresentou a menor absorção de água e o menor coeficiente de capilaridade, indicando um refinamento significativo da estrutura de poros devido à hidratação prolongada promovida pela liberação de água do biochar. Os demais traços apresentaram desempenho comparável ou ligeiramente superior ao referência, sugerindo que o biochar não compromete, e pode até melhorar, a estanqueidade do concreto.

Em suma, a análise comparativa demonstra que o uso de biochar pré-umedecido em teores baixos (2,5%) é técnica e ambientalmente viável, proporcionando ganhos de resistência mecânica e potencial durabilidade sem prejudicar a trabalhabilidade. O uso de biochar seco, embora benéfico para a resistência final e durabilidade, apresenta desafios reológicos que dificultam sua aplicação prática sem ajustes significativos de água. O estudo aponta para o biochar como uma alternativa promissora para a produção de concretos mais sustentáveis, desde que respeitados os limites de dosagem e o método de incorporação.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AKHTAR, Ali; SARMAH, Ajit 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. Acesso em: 17 abr. 2025. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.10.319>.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 5738:** Concreto — Procedimento para moldagem e cura de corpos-de-prova. Rio de Janeiro, 2015.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 5739:** Concreto — Ensaio de compressão de corpos-de-prova cilíndricos. Rio de Janeiro, 2018.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 16916:2021:** Agregado miúdo — Determinação da densidade e da absorção de água. Rio de Janeiro, 2021.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 16917:2021:** Agregado graúdo — Determinação da densidade e da absorção de água. Rio de Janeiro, 2021.

ASTM INTERNATIONAL. **ASTM C128 / C128M-22:** Standard Test Method for Relative Density (Specific Gravity) and Absorption of Fine Aggregate. West Conshohocken, PA, 2022.

BARBHUIYA, Salim; DAS, Bibhuti Bhusan; KANAVARIS, Fragkoulis. **Biochar-concrete: A comprehensive review of properties, production and sustainability.** *Case Studies in Construction Materials*, v. 20, e02859, 2024. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S221450952400010X>. Acesso em: 09 abr. 2025. Acesso em: 17 abr. 2025. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2024.e02859>.

BIANCHINI, G. et al. Recycling of construction and demolition waste materials: a chemical–mineralogical appraisal. **Waste Management**, v. 25, n. 2, p. 149-159,

2005. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0956053X04001576>. Acesso em: 19 maio 2025. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2004.09.005>.

CIMENTOS VOTORAM. **Cimento Portland: Ficha de Informações de Segurança de Produtos Químicos – FISPQ**. Rev. 00. [S.l.], 2020. Disponível em: https://s3.amazonaws.com/mapa-da-obra-producao/wp-content/uploads/2015/12/FIS-PQ-Cimento-Rev-00_-2020.pdf. Acesso em: 21 out. 2025.

COSENTINO, Isabella et al. **Type of materials, pyrolysis conditions, carbon content and size dimensions**: The parameters that influence the mechanical properties of biochar cement-based composites. *Theoretical and Applied Fracture Mechanics*, v. 103, 102261, out. 2019. Acesso em: 17 abr. 2025. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.tafmec.2019.102261>.

CP IV – Cimento Portland pozolânico. In: CIMENTO.ORG. [S.l.: s.d.]. Disponível em: <https://cimento.org/cp-iv-32-cimento-portland-pozolanico/>. Acesso em: 21 out. 2025.

DE BORTOLI, Anne. **Understanding the environmental impacts of virgin aggregates**: Critical literature review and primary comprehensive life cycle assessments. *Journal of Cleaner Production*, v. 415, p. 137629, 2023. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0959652623017870>. Acesso em: 13 abr. 2025. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2023.137629>

DIXIT, Anjaneya et al. **Waste valorisation using biochar for cement replacement and internal curing in ultra-high performance concrete**. *Journal of Cleaner Production*, v. 238, p. 117876, 2019. DOI: 10.1016/j.jclepro.2019.117876. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.117876>. Acesso em: 29 jun. 2024.

GOWRI, T. Vijaya et al. **Sustainable Concrete Pavements**: A Comparative Analysis of Biochar-Supplemented and Conventional Concrete in terms of Strength, Carbon Emissions, and Cost. *Journal of Physics: Conference Series*, v. 2779, n. 1, 012014,

2024. Acesso em: 22 abr. 2025. DOI: <https://doi.org/10.1088/1742-6596/2779/1/012014>.

GUPTA, Souradeep; KUA, Harn Wei. **Carbonaceous micro-filler for cement:** Effect of particle size and dosage of biochar on fresh and hardened properties of cement mortar. *Science of the Total Environment*, v. 662, p. 952-962, mai. 2019. Acesso em: 22 abr. 2025. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.01.269>.

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. 2018a. Acesso em: 20 abr. 2025. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.02.104>.

GUPTA, S.; KUA, H.; LOW, C. **Use of biochar as carbon sequestering additive in cement mortar.** *Cement and Concrete Composites*, v. 87, p. 110-129, 2018b. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2017.12.009>.

GUPTA, Souradeep; MUTHUKRISHNAN, Shravan; KUA, Harn Wei. **Comparing influence of inert biochar and silica rich biochar on cement mortar** - Hydration kinetics and durability under chloride and sulfate environment. *Construction and Building Materials*, v. 268, 121142, jan. 2021. Acesso em: 20 abr. 2025. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.121142>.

GUPTA, Souradeep; KUA, Harn Wei; PANG, Sze Dai. Effect of biochar on mechanical and permeability properties of concrete exposed to elevated temperature. **Construction and Building Materials**, v. 234, 117338, 2020. ISSN 0950-0618. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0950061819327904>. Acesso em: 19 maio 2025. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.117338>.

LEHMANN, J., Joseph, S. **Biochar for Environmental Management:** an introduction, In: J. Lehmann, J.; Joseph, S.(eds.), *Biochar for Environmental Management: Science and Technology*, v. 1, Sterling, Earthscan, 2009, p. 1–12. Acesso em: 06 abr. 2025. Disponível em:

https://www.biochar-international.org/wp-content/uploads/2018/04/Biochar_book_Chapter_1.pdf.

Maljaee, Hamid et al. **Incorporation of biochar in cementitious materials: A roadmap of biochar selection.** *Construction and Building Materials*, v. 283, 122757, jun. 2021. Acesso em: 19 maio 2025. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.122757>.

MEHTA, P. K.; MONTEIRO, P. J. M. **Concreto: microestrutura, propriedades e materiais.** 2. ed. São Paulo: IBRACON, 2014.

MEKKY, Khadiga M. et al. **Evaluating environmental and economic benefits of using biochar in concrete: A life cycle assessment and multi-criteria decision-making framework.** *Case Studies in Construction Materials*, v. 21, e03712, 2024. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2214509524008635>. Acesso em: 09 abr. 2025. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2024.e03712>.

Neville, A. M. **Propriedades do Concreto.** 5. ed. Porto Alegre: Bookman, 2016.

ORGANIZAÇÃO DAS NAÇÕES UNIDAS (ONU). Assembleia Geral. Resolução A/RES/70/1, de 25 de setembro de 2015. **Transformando Nosso Mundo: A Agenda 2030 para o Desenvolvimento Sustentável.** [S. l.]: ONU, 2015. Disponível em: <https://brasil.un.org/sites/default/files/2020-09/agenda2030-pt-br.pdf>. Acesso em: 19 maio 2025.

REUTERS. **Australian researchers turn morning coffee waste into greener concrete.** Reuters, 22 maio 2024. Disponível em: <https://www.Reuters.com/business/environment/australian-researchers-turn-morning-coffee-waste-into-greener-concrete-2024-05-22/>. Acesso em: 19 maio 2025.

ROYCHAND, Rajeev et al. **Transforming spent coffee grounds into a valuable resource for the enhancement of concrete strength.** *Journal of Cleaner Production*, v. 419, p. 138205, 2023. Disponível em:

<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0959652623023636>. Acesso em: 10 abr. 2025. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2023.138205>.

SENADHEERA, Sachini Supunsala et al. ***Application of biochar in concrete – A review***. *Cement and Concrete Composites*, v. 143, p. 105204, 2023. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0958946523002780>. Acesso em: 10 abr. 2025. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2023.105204>.

TAN, Kanghao et al. **Properties of cement mortar containing pulverized biochar pyrolyzed at different temperatures**. *Construction and Building Materials*, v. 263, 120616, dez. 2020. Acesso em: 19 maio 2025. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.120616>.

UNITED NATIONS ENVIRONMENT PROGRAMME (UNEP). **Sand and sustainability**: 10 strategic recommendations to avert a crisis. Nairobi: UNEP, 2019. Disponível em: https://wedocs.unep.org/bitstream/handle/20.500.11822/38362/sand_sustainability.pdf. Acesso em: 19 maio 2025.