



**UNIVERSIDADE FEDERAL DO OESTE DA BAHIA
CENTRO DAS CIÊNCIAS EXATAS E DAS TECNOLOGIAS
CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL**

AMANDA TRINDADE RIBEIRO CONEGUNDES

**AVALIAÇÃO DA INCOPORAÇÃO DE CINZAS ORIUNDAS DA QUEIMA DO
CARVÃO DE CHURRASQUEIRA EM MATRIZES CIMENTÍCIAS**

BARREIRAS-BA

2025

AMANDA TRINDADE RIBEIRO CONEGUNDES

**AVALIAÇÃO DA INCOPORAÇÃO DE CINZAS ORIUNDAS DA QUEIMA DO
CARVÃO DE CHURRASQUEIRA EM MATRIZES CIMENTÍCIAS**

Trabalho de Conclusão de Curso II apresentado ao
Curso de Engenharia Civil da Universidade
Federal do Oeste da Bahia, como requisito parcial
à obtenção do grau de engenheiro civil.

Orientador: Dr. Kuelson Randello Dantas Maciel

BARREIRAS-BA

2025

FICHA CATALOGRÁFICA

C747 Conegundes, Amanda Trindade Ribeiro.

Avaliação da incorporação de cinzas oriundas da queima do carvão de churrasqueira em matrizes cimentícias. / Amanda Trindade Ribeiro Conegundes. – 2025.

77f.

Orientador: Dr. Kuelson Rândello Dantas Maciel
Monografia (Graduação) – Bacharelado em Engenharia Civil. Universidade Federal do Oeste da Bahia. Centro das Ciências Exatas e das Tecnologias. Barreiras, BA, 2025.

1. Cinzas de churrasqueira. 2. Materiais cimentícios suplementares. 3. Sustentabilidade. 4. Efeito filer. I. Maciel, Kuelson Rândello Dantas. II. Universidade Federal do Oeste da Bahia - Centro das Ciências Exatas e das Tecnologias. III. Título.

AMANDA TRINDADE RIBEIRO


**AVALIAÇÃO DA INCOPORAÇÃO DE CINZAS ORIUNDAS DA QUEIMA DO
CARVÃO DE CHURRASQUEIRA EM MATRIZES CIMENTÍCIAS**

Trabalho de Conclusão de Curso II apresentado ao
Curso de Engenharia Civil da Universidade
Federal do Oeste da Bahia, como requisito parcial
à obtenção do grau de engenheiro civil.
Orientador: Dr. Kuelson Randello Dantas Maciel

Aprovada em 18 de julho de 2025.

Banca Examinadora

Dr. Kuelson Randello Dantas Maciel (Orientador)
Universidade Federal do Oeste da Bahia (UFOB)


Dr. Elier Pavon de La Fe
Universidade Federal do Oeste da Bahia (UFOB)

Ms. Nathan Araujo de Souza
Eng. Civil da Prefeitura Municipal de Barreiras

AGRADECIMENTOS

Em primeiro lugar, agradeço a Deus, por me conceder forças nos momentos difíceis e iluminar meu caminho ao longo desta jornada.

Aos meus pais, minha eterna gratidão. Mesmo diante de condições adversas, nunca mediram esforços para me proporcionar acesso à educação, sempre me incentivando e acreditando no meu potencial.

Ao meu marido, Yago, agradeço imensamente por todo amor, paciência e compreensão. Sua presença foi fundamental para que eu enfrentasse esse processo com mais leveza.

Ao meu professor orientador, Kuelson Maciel, agradeço profundamente pelo apoio constante, pela paciência, pelos ensinamentos e, principalmente, por acreditar em mim. Sua orientação foi fundamental para a realização deste trabalho.

Também agradeço à minha colega Giovanna e ao professor Valdeilson Braga, pela colaboração e parceria durante os experimentos. A ajuda de vocês foi essencial para que as etapas desta pesquisa fossem concluídas com sucesso.

Não posso deixar de reconhecer também a excelência dos professores da Universidade Federal do Oeste da Bahia – UFOB. Cada aula, cada orientação e cada palavra contribuíram de forma significativa para minha formação acadêmica e pessoal.

A todos vocês, meu muito obrigado.

RESUMO

Este Trabalho de Conclusão de Curso (TCC) avaliou o potencial de substituição das cinzas oriundas da queima do carvão de churrasqueira em matrizes cimentícias suplementares, com a finalidade de encontrar alternativas sustentáveis que diminuam os impactos ambientais da produção do cimento e aproveitar resíduos sólidos urbanos frequentemente descartados. Para a realização da pesquisa foram coletadas cinzas da churrasqueira de um restaurante de Barreiras-BA. Foi analisado as propriedades físicas, químicas e mineralógicas das matérias-primas e das pastas de cimento com substituição de 5, 10 e 15% de teores de cinza de carvão de churrasqueira (CCC) no cimento Portland composto com fíler (CPII F) e o cimento Portland de alta resistência inicial (CPV-ARI), comparando seu desempenho com as pastas de referências. Os resultados indicam que as cinzas atuam predominantemente como material inerte de preenchimento (efeito fíler), devido à sua granulometria fina e bem graduada, com tamanho de partículas entre 0,1 μm e 1 mm, e não apresentam reatividade pozolânica significativa, conforme indicam os baixos teores dos óxidos SiO_2 , Al_2O_3 e Fe_2O_3 em sua composição química. A avaliação da resistência a compressão e da absorção de água por imersão evidenciou que a incorporação de até 10% de CCC em pastas de cimento é viável para elementos que não exijam alta resistência mecânica, atingindo valores maiores que 20MPa, embora não tenha promovido melhorias em relação as pastas de referência. Os resultados obtidos por meio do FTIR e das análises térmicas mostrou que as pastas com CCC apresentam comportamento semelhante as pastas de referência, o que indica que o processo de hidratação não foi prejudicado pela presença do resíduo e ao mesmo tempo que o resíduo de cinza de carvão poderá ser utilizado como MCS.

Palavras – chave: cinzas de churrasqueira, materiais cimentícios suplementares, sustentabilidade, efeito fíler.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Processo Produtivo da Indústria de cimento.....	22
Figura 2 - Fluxograma do programa experimental.....	37
Figura 3 - Resíduos de carvão da churrasqueira do estabelecimento Bar do Peixe	40
Figura 4 - Amostras de cinza de carvão de churrasqueira a) sem peneiramento e b) com peneiramento	40
Figura 5 - Equipamento S8 Tiger (a) Prensa para produção de pastilhas.....	42
Figura 6 - Goniômetro do equipamento Rigaku para análise por difração de raios-X (DRX).	43
Figura 7 - Equipamento para as análises térmicas.....	44
Figura 8 - Fluxograma do programa experimental da produção da pasta de cimento....	45
Figura 9 - Pesagem das matérias-primas (a) água (b) cimento.....	45
Figura 10 - Misturador mecânico modelo 715 da marca FISATOM	47
Figura 11 - Moldes dos corpos de prova com desmoldantes.....	47
Figura 12 - Moldagem dos corpos de prova do CPII	47
Figura 13 - Espectrômetro da marca Perkin Elmer (a) e prensa hidráulica da marca Shimadzu (b).	48
Figura 14 - Corpos de prova para o teste de FTIR após prensagem.....	49
Figura 15 - Secagem dos corpos de prova em estufa a $105^{\circ}\text{C} \pm 5$	50
Figura 16 - Corpos de prova rompidos no ensaio de compressão axial (a) CPV e (b) CPII	51
Figura 17 - Curvas de distribuição de partículas das matérias primas	52
Figura 18 - Curvas de análise termogravimétrica, análise termogravimétrica derivada e análise térmica diferencial do CPII, CPV e das cinzas de carvão de churrasqueira.....	55
Figura 19 - Difractograma de raios-X das materiais primas: CPII e CPV (C ₄ AF:Ferrita (Ca ₂ (AlFe)O ₅), CS:Anidrita (CaSO ₄), CH:Portlandita (Ca(OH) ₂), CC:Calcita(CaCO ₃), C ₃ S: Alita (Ca ₃ SiO ₅), C ₂ S β: Belita β(Ca ₃ SiO ₄), C ₃ A:Aluminato cúbico (Ca ₃ Al ₂ O ₆), M-Periclásio (MgO)); Cinza (Mu: Muscovita (KAl ₂ Si ₃ AlO ₁₀ (OH) ₂), Q: Quartzo (SiO ₂), K:Caolinita (Al ₄ (OH) ₈ (Si ₄ O ₁₀), Gh – Hidrato de sulfato de cálcio e potássio (K ₂ Ca ₅ (SO ₄) ₆ (H ₂ O), CC: Calcita (CaCO ₃)).	56
Figura 20 - Espectros de FTIR para as amostras CPII5, CPII10 e CPII15.	58
Figura 21 - Espectros de FTIR para as amostras CPV5, CPV10 e CPV15.....	58

Figura 22 - Curvas de análise termogravimétrica, análise termogravimétrica derivada e análise térmica diferencial para os materiais de CPII REF, CPII5, CPII10 e CPII15 após 28 dias.....	59
Figura 23 - Curvas de análise termogravimétrica, análise termogravimétrica derivada e análise térmica diferencial para os materiais de CPV REF, CPV5, CPV10 e CPV15 após 28 dias.....	61
Figura 24 - - Difractograma de raios-X das pastas de cimento contendo CCC aos 28 dias (Et: Etringita; CH: Portlandita; CC; Calcita; C ₂ S β: Belita b; C ₃ S β: Alita; C ₄ AF: Ferrita; CSH Jenita.	62
Figura 25 - Absorção de água das pastas de cimento, CPV e CPII com substituição de cinza de carvão aos 28 dias.....	62
Figura 26 - Resistencia à compressão das pastas de cimento com cimento CPV (REF CPV) e com substituição de cinza de carvão em 5, 10 e 15% aos 3, 7 e 28 dias.	64
Figura 27 - Resistencia à compressão das pastas de cimento com cimento CPII (REF CPII) e com substituição de cinza de carvão em 5, 10 e 15% aos 3, 7 e 28 dias.	65

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 - Estudos sobre utilização de resíduos agrícolas como adições minerais em matrizes cimentícias	32
Quadro 2 - Descrição dos ensaios realizados e resultados esperados.....	38

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Principais compostos do cimento Portland	20
Tabela 2 - Formulações das pastas de cimentos	46
Tabela 3 - Resultados dos ensaios de FRX.....	54

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

AA	Absorção de Água
ABCP	Associação Brasileira de Cimento Portland
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ACV	Análise do Ciclo de Vida
AFm	Monossulfoaluminato de Cálcio Hidratado
AFt	Trissulfoaluminato de Cálcio Hidratado (Etringita)
Al ₂ O ₃	Óxido de Alumínio
AR	Alta Resistência
C-H-S	Silicato de Cálcio Hidratado
Ca(OH) ₂	Hidróxido de Cálcio (Portlandita)
CaO	Óxido de Cálcio
CCC	Cinza de Carvão de Churrasqueira
CH	Hidróxido de Cálcio (Portlandita)
CPII	Cimento Portland Composto
CPII F	Cimento Portland Composto com Fíler
CPII REF	Cimento Portland Composto com Fíler de Referência
CP	Corpo de Prova
CPV	Cimento Portland de Alta Resistência Inicial
CPV ARI	Cimento Portland de Alta Resistência Inicial (Alta Resistência Inicial)
CPV REF	Cimento Portland de Alta Resistência Inicial de Referência
C ₂ S	Silicato Dicálcico (2CaO·SiO ₂)
C ₃ A	Aluminato Tricálcico (3CaO·Al ₂ O ₃)
C ₃ S	Silicato Tricálcico (3CaO·SiO ₂)
C ₄ AF	Ferroaluminato Tetracálcico (4CaO·Al ₂ O ₃ ·Fe ₂ O ₃)
D10%	Diâmetro 10% acumulado
D50%	Diâmetro 50% acumulado
D90%	Diâmetro 90% acumulado
DRX	Difração de Raios X

DTG	Derivada Termogravimétrica
DTA	Análise Térmica Diferencial
Fe ₂ O ₃	Óxido de Ferro (III)
FTIR	Espectroscopia no Infravermelho com Transformada de Fourier
FRX	Fluorescência de Raios X
GCCA	Global Cement and Concrete Association
ISCD	Inorganic Crystal Structure Database
K ₂ O	Óxido de Potássio
LAB	Laboratório
MCS	Materiais Cimentícios Suplementares
MgO	Óxido de Magnésio
NBR	Norma Brasileira Regulamentadora
P ₂ O ₅	Pentóxido de Fósforo
PF	Perda ao Fogo
RAA	Reação Álcalis-Agregado
RC&D	Resíduos de Construção e Demolição
RCC	Resíduos da Construção Civil
RSU	Resíduos Sólidos Urbanos
SEEG	Sistema de Estimativas de Emissões de Gases de Efeito Estufa
SiO ₂	Dióxido de Silício (Sílica)
SINIC	Sindicato Nacional da Indústria do Cimento
TCC	Trabalho de Conclusão de Curso
TG	Termogravimetria
TGA	Análise Termogravimétrica
UFOB	Universidade Federal do Oeste da Bahia
USEPA	United States Environmental Protection Agency

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	15
1.1 HIPÓTESES	17
1.2 OBJETIVOS.....	17
1.2.1. Objetivos específicos.....	17
1.3 ESTRUTURA DO TRABALHO	18
2. REVISÃO DE LITERATURA.....	19
2.1. CIMENTO PORTLAND	19
2.1.1. Histórico	19
2.1.2. Fases do cimento Portland.....	20
2.1.3. Impactos gerados na fabricação do cimento.....	22
2.2. MATERIAIS CIMENTÍCIOS SUPLEMENTARES (MCS)	24
2.3. RESÍDUOS SÓLIDOS.....	26
2.3.1. GERAÇÃO DE RESÍDUOS SÓLIDOS E PREJUÍZOS AO MEIO AMBIENTE 26	
2.4 CARACTERÍSTICAS E PROPRIEDADES DAS MATERIAS PRIMAS E PASTAS DE CIMENTO.....	27
2.5 APROVEITAMENTO DE RESÍDUOS SÓLIDOS EM MATRIZES CIMENTÍCIAS	30
3. PROGRAMA EXPERIMENTAL	37
3.1 MATERIAIS	39
3.1.1. Cimento	39
3.1.2. Cinza de carvão de churrasqueira.....	39
3.1.3. Água	41
3.2 ETAPA 1 - CARACTERIZAÇÃO DAS MATERIAS-PRIMAS (CINZAS E CIMENTOS CPII E CPV).....	41
3.2.1. Granulometria a laser	41
3.2.2. Composição química	41
3.2.3. Difractometria de Raios x (DRX)	42
3.2.4. Análise térmica (TG/DTA)	43
3.3 ETAPA 2 - PRODUÇÃO DE PASTAS DE CIMENTO COM SUBSTITUIÇÃO DO CIMENTO POR CINZAS DE CARVÃO DE CHURRASQUEIRA (CCC).....	44
3.3.1. Formulação.....	45

3.3.2.	Produção das pastas de referência e conteúdo cinza de carvão de churrasqueira	46
3.3.3.	Espectroscopia no Infravermelho com Transformada de Fourier (FTIR).....	48
3.3.4.	Difratometria de Raios X (DRX)	49
3.3.5.	Análise térmica (TG/DTA)	49
3.3.6.	Absorção de água por imersão (AA).....	49
3.3.7.	Resistência à Compressão Axial	50
4.	RESULTADOS E DISCUSSÃO	52
4.1	CARACTERIZAÇÃO DAS MATERIAIS-PRIMAS DE PARTIDAS.....	52
4.1.1.	Distribuição de partículas das matérias primas	52
4.1.2.	Composição Química	53
4.1.3.	Análise Térmica (TG/DTG e DTA)	54
4.1.4.	Difratometria de raios X (DRX).....	56
4.2	PRODUÇÃO DE PASTAS DE CIMENTO COM SUBSTITUIÇÃO DO CIMENTO POR CINZA	57
4.2.1.	Espectroscopia no Infravermelho com Transformada de Fourier (FTIR).....	57
4.2.2.	Análise térmica (TG/DTG e DTA)	59
4.2.3.	Difratometria de raios X (DRX) das pastas de cimento	61
4.2.4.	Absorção de água por imersão (AA).....	62
4.2.5.	Resistência à Compressão Axial	63
5.	CONCLUSÃO.....	67
5.1	SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	68
	REFERÊNCIAS	69

1. INTRODUÇÃO

O cimento Portland é constituído de gipsita, calcário, sílica, alumina e óxido de ferro. A partir da queima e moagem desses materiais e posteriormente da queima em forno rotativo a 1450 °C origina-se o clínquer (cimento não pulverizado) que passa pelo processo de moagem para originar o cimento (Rodrigues, 2012). De acordo com o Sindicato Nacional da Indústria do cimento – SINIC (2020), o cimento é fundamental para suprir as principais necessidades do País: habitação e infraestrutura. É inegável sua função social primordial como parte integrante do concreto e da argamassa, usado no mundo todo como principal bloco de construção de infraestrutura (USEPA, 2025). Porém, o cimento é um importante contribuinte para a mudança climática, seu processo produtivo no Brasil é responsável por cerca de 1,15 toneladas de calcário para produzir uma tonelada de clínquer, que causa aproximadamente 510 kg de CO₂, sem considerar a emissão de CO₂ pela queima de combustíveis fósseis (Jhon, 2017). Segundo a Global Cement and Concrete Association (GCCA), o roteiro Net Zero da GCCA, lançado em 2021, mostrar o empenho das indústrias de cimento e concreto com a descarbonização, o intuito é reduzir as emissões de CO₂ em mais de 25% até 2030 e a descarbonização total até 2050.

Um grande desafio para a indústria do concreto é alcançar um padrão sustentável de crescimento enquanto atende a demanda crescente do concreto. A elaboração de um cimento com um viés sustentável deveria ser o primeiro objetivo para minimizar as emissões de gases de efeito estufa, a extração de recursos naturais e o consumo de energia (Figueiredo, 2023). Por esses motivos, há um aumento da busca por Materiais Cimentícios Suplementares (MCS), que são compostos de partículas finas com características semelhantes ou complementares às do cimento (Figueiredo e Kuster, 2019). Segundo Martins (2018), esses materiais, também chamados de adições minerais, podem ser de origem natural, como erupções vulcânicas, ou naturalmente processados, como argilas calcinadas, ou de origem artificial, como resíduos de outras indústrias que inicialmente seriam descartados. Podendo ter efeito pozolânico ou de preenchimento (filler).

Existe uma grande quantidade de publicações sobre resíduos com potencial de aplicação em matrizes cimentícias (Lopes, 2023). Dentre elas, destacam-se os resíduos de construção e demolição (Brasileiro e Matos, 2015; Silva et al., 2020; Resende, 2022), cinza de casca de arroz (Rodrigues e Beraldo, 2010; Silva, 2020; Oliveira e Tiecher, 2023), cinza de casca de caju (Lima, 2010; Lima e Rossignolo, 2009; Felício, 2018), de vidro (Simões et al., 2013; Brito, 2021; Salvador Filho et al., 2017), de borracha de pneu (Medeiros et al., 2021; Silva, 2019;

Mercado e Barboza 2022), bagaço de cana-de-açúcar (Figueiredo, 2023; Santos et al., 2020; Rodrigues, 2012), agrícola (Moretti, 2018; Reis et al., 2019; Aquino, 2021), cerâmico (Formigoni et al, 2019; Costa et al, 2020; Campos et al., 2022) e cascalho de poços de petróleo (Pires, 2009; Liu, Y. et al., 2022; Maciel, 2023). Dos diferentes tipos de resíduos sólidos urbanos (RSU) que podem ser transformados em subprodutos, o volume significativo de resíduos na forma de cinzas resulta em problemas ambientais porque não apresentam valor comercial e são desprezados em aterros (Martins, 2022).

Silva (2020) investigou a aplicação da cinza de casca de arroz (CCA) em substituiu parcialmente do cimento com um teor de 10%, considerando uma relação água para cimento de $a/c = 0,45$ e diferentes dosagens de dois aditivos. O estudo visou determinar uma dosagem viável que apresentasse boa trabalhabilidade, baixa viscosidade plástica e razoável tensão de escoamento para potenciais aplicações em argamassas e concretos autoadensáveis. Os resultados da pesquisa indicaram que os aditivos químicos usados não afetavam a resistência à compressão, concluindo que a substituição do cimento por 10% de CCA aumentou a resistência a compressão em aproximadamente 29,4% aos 7 dias de cura e de aproximadamente 16,06% aos 28 dias de cura.

Santos et al. (2020) estudaram os efeitos da adição e substituição do bagaço da cana-de-açúcar em matrizes cimentícias. O objetivo da pesquisa foi analisar, por meio de uma revisão bibliográfica, os impactos da presença da cinza do bagaço da cana-de-açúcar (CBC) em matrizes cimentícias. Os autores concluíram que a CBC contém propriedades satisfatórias para a substituição parcial de cimento Portland, apresentando características pozolânicas e viabilidade de substituição de até 30% da massa de cimento sem comprometer significativamente a resistência em comparação com as argamassas sem adição. Todavia, ressalta-se a ausência de uma análise das condições ideais de utilização as CBC, considerando os variados fatores que podem influenciar o desempenho dessa adição em compósitos à base de cimento Portland.

O carvão vegetal, resultante da queima ou carbonização da madeira, é uma fonte de energia utilizada em residências e estabelecimentos comerciais como fonte de energia acessível em aquecedores, lareiras e churrasqueiras (Reis et al., 2019). Conforme relatado no Balanço Energético Nacional de 2022, emitido pelo Ministério de Minas e Energia (2023), o consumo total e final de carvão vegetal atingiu 6.831×10^3 t, dos quais 611×10^3 t foram destinadas a residências e 119×10^3 t ao comércio. Embora haja uma variedade de pesquisas voltadas para o

aproveitamento de resíduos agroindustriais em matrizes cimentícias, é notável a escassez de estudos dedicados aos resíduos de carvão vegetal (RCV) (Reis et al., 2019).

Ribeiro et al. (2021) analisaram o desempenho físico-químico de argamassas cimentícias contendo resíduos de carvão vegetal amazônico. Substituindo teores de 5% e 10% em massa do aglomerante principal (Cimento Portland). Os resultados indicaram uma diminuição no desempenho mecânico dos compósitos quando adicionados em 5%. Entretanto, aqueles com 10% de cinza de carvão vegetal amazônico demonstraram o melhor desempenho geral. Embora sugerissem uma possível redução na durabilidade com o passar do tempo.

A utilização de resíduos como subprodutos pode reduzir os impactos ambientais dos novos materiais, substituir os recursos naturais e oferecer uma alternativa para a diminuição de resíduos em aterros (Blengini e Garbarino, 2010). Considerando que, após o uso doméstico, o carvão vegetal gera Resíduos Sólidos Urbanos (RSU), comumente referidos como cinzas, há uma lacuna de pesquisas a ser explorada. Desse modo, esse trabalho visa avaliar as cinzas de carvão de churrasqueira (CCC) como material cimentício suplementar na produção de pastas de cimento.

1.1 HIPÓTESES

É possível incorporar cinzas de carvão de churrasqueira (CCC) como materiais cimentícios suplementares (MCS) em pastas de cimento, para serem utilizadas na construção civil, sem perdas consideráveis nas propriedades físicas, mineralógicas e mecânicas das pastas de cimento e propriedades de preenchimento, ou seja, que apresentem efeito fíler.

1.2 OBJETIVOS

O presente trabalho tem como objetivo avaliar o potencial de substituição das cinzas oriundas da queima do carvão de churrasqueira em matrizes cimentícias suplementares.

1.2.1. Objetivos específicos

Caracterizar as matérias-primas utilizadas na formulação das pastas de cimento, através da determinação das propriedades: física por granulometria a laser, mineralógica através da Difractometria de Raios X (DRX), química por meio do ensaio de Fluorescência de Raios X (FRX) e térmica, por análise de TG/DTA.

Investigar o efeito da substituição parcial do cimento por cinzas de carvão de churrasqueira (0%, 5%, 10% e 15%) nas propriedades mineralógicas e químicas das pastas de

cimento, com foco no ensaio de Espectrometria no Infravermelho com Transformada de Fourier (FTIR) e de Difractometria de Raios X (DRX), além da análise térmicas por meio do ensaio de TG/DTA, para estudar o processo de hidratação das pastas.

Analisar a influência da incorporação de diferentes teores de substituição de cinzas (0%, 5%, 10% e 15%) nas propriedades físicas como absorção de água das pastas de cimento.

Determinar a resistência à compressão das pastas de cimento contendo 5%, 10% e 15% de cinzas de carvão de churrasqueira.

1.3 ESTRUTURA DO TRABALHO

Este trabalho está estruturado em cinco capítulos. Este capítulo apresentou os tópicos introdutórios do Trabalho de Conclusão de Curso (TCC), incluindo a justificativa que motivou essa pesquisa integrada ao corpo desta introdução, as hipóteses, os objetivos gerais e específicos, bem como a estrutura adotada para a organização da tese.

O capítulo 2 apresenta uma revisão da literatura sobre a composição do cimento Portland e as fases de sua hidratação, abordando também a história e os impactos ambientais associados à sua produção. Em seguida, o capítulo explora os materiais cimentícios suplementares (MCS), discorrendo sobre a sua importância e o aproveitamento desses materiais, com ênfase em estudos anteriores sobre a substituição parcial do cimento por resíduos sólidos. Além disso, o capítulo 2 discorre sobre as características e propriedades das matérias primas e das pastas de cimento estudadas nesse documento.

No capítulo 3 é descrito o programa experimental aplicado na pesquisa, incluindo os materiais utilizados, os métodos empregados para a caracterização física, química e mineralógica dos materiais, além da produção e análise das cinzas de carvão de churrasqueira (CCC) e das pastas de cimento.

No capítulo 4 são apresentados os resultados e a discussão sobre a caracterização dos materiais de partida, bem como a avaliação da produção das cinzas de carvão de churrasqueira e pastas de cimento.

No capítulo 5 estão expressas as conclusões e sugestões para trabalhos futuros, seguidas pelas Referências.

2. REVISÃO DE LITERATURA

Esse capítulo tem como objetivo apresentar os principais conceitos, fundamentos e estudos relacionados ao tema dessa pesquisa, fornecendo uma base teórica para o desenvolvimento do trabalho. O capítulo 2 aborda inicialmente sobre a história do Cimento Portland, assim como sua composição, suas fases e os impactos ambientais decorrentes de sua fabricação. Em seguida, discorre-se sobre o aproveitamento de resíduos como alternativa sustentável para a substituição parcial do cimento. Por fim, são apresentadas as características e propriedades das matérias primas e das pastas de cimento, bem como exemplos do uso de resíduos nesses compósitos.

2.1. CIMENTO PORTLAND

2.1.1. Histórico

O cimento, material preponderante na construção civil, tem suas raízes nas pirâmides do Antigo Egito, onde era fabricado a partir de uma mistura de gesso calcinado com terra vulcânica. No entanto, somente em 1824, no Reino Unido, que Joseph Aspdin desenvolveu o “Cimento Portland”, adicionando minérios em alto forno (Silva, 2022).

No Brasil, os primeiros registros da produção de cimento remontam ao final do século XIX, na ilha de Tiriri, município de Santa Rita, Paraíba (Medeiros e Torres, 2019). Em 1897, a primeira fábrica de cimento no país foi instalada na Usina Rodovalho, no estado de São Paulo, coincidindo quase simultaneamente, com o desenvolvimento das indústrias têxtil e alimentícia (Santos, 2011).

Durante seu processo de consolidação, a indústria cimenteira brasileira enfrentou diversas dificuldades. Primeiro, a atividade econômica estava excessivamente dependente da proximidade das matérias-primas em relação às fábricas. Em seguida, no início do século XX, as principais reservas de calcário estavam distantes dos mercados consumidores potenciais. Além disso, o sistema de transporte ainda era incipiente, e o cimento podia ser importado sem nenhuma tarifa alfandegária (Santos, 2005). Assim, somente no final da década de 1920, com a entrada em operação da fábrica da Companhia Brasileira de Cimento Portland (CBCP), a produção cimenteira se instalou e amadureceu no Brasil (Silva, 2022).

O crescimento exponencial no Brasil ocorreu a partir dos anos 1930, quando os três principais produtores de cimento - Companhia Brasileira de Cimento Portland (CBCP), Companhia Nacional de Cimento Portland (CNCP) e Votorantim – detinham cerca de 80% do

mercado interno (Peláez, 1972). Na transição dos anos 1960 para os 1970, o Brasil experimentou um intenso desenvolvimento econômico, especialmente no setor da construção civil, impulsionado por políticas habitacionais governamentais, rápida urbanização e grandes projetos de infraestrutura, como hidrelétricas, rodovias e pontes. Nesse período, as importações passaram a representar aproximadamente 2% da demanda interna (Meloro, 1996; Silva, 2022).

Santos (2011) discorreu sobre o aumento significativo da produção e consumo do cimento, desde meados de 2003, por causa dos investimentos expressivos em novas unidades fabris, como os programas habitacionais (Minha Casa Minha Vida) e o rápido avanço internacional de grupos brasileiros (Votorantim, Camargo Corrêa e CSN).

Segundo o SINIC (2022), o ápice da produção de cimento no Brasil ocorreu em 2014, com 71,9 milhões de toneladas, enquanto as vendas totalizaram 63 milhões de toneladas em 2022, registrando uma retração de 2,8% sobre o ano anterior.

2.1.2. Fases do cimento Portland

O cimento Portland é um ligante hidráulico, constituído de gipsita, calcário, sílica, alumina e óxido de ferro. A partir da queima e moagem desses materiais e posteriormente da queima em forno rotativo a 1450 °C origina-se o clínquer (cimento não pulverizado) que passa pelo processo de moagem para originar o cimento (Rodrigues, 2012; NBR 16697, 2018).

Durante a fase anidro, o cimento Portland consiste principalmente nos óxidos não hidratados dos componentes principais, os quais são: silicato tricálcico (alita), silicato dicálcico (belita), aluminato tricálcico (aluminato) e ferroaluminato tetracálcico (ferrita). Essa fase corresponde ao estado do cimento antes do início da hidratação, após a moagem do clínquer. A Tabela 1 apresenta a composição e característica de cada fase citada.

Tabela 1 - Principais compostos do cimento Portland

Compostos químicos	Funcionalidades e características
Silicato tricálcico ($3\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2 = \text{C}_3\text{S}$)	Representa aproximadamente 50-70% da massa total do clínquer. Contribui para a resistência inicial e final do cimento após a hidratação. Possui responsabilidade pelo tempo de pega do cimento, segundo componente em importância no processo de liberação de calor.
Silicato dicálcico ($2\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2 = \text{C}_2\text{S}$)	Constitui cerca de 15-30% da massa do clínquer. Menos reativo que o C3S, mas é relevante no processo de endurecimento em idades mais avançadas, responsável pelo ganho de resistência a longo prazo.
Aluminato tricálcico ($3 \text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 = \text{C}_3\text{A}$)	Representa cerca de 5-10% da massa do clínquer. Responsável pela hidratação inicial rápida do cimento, influenciando na resistência dos primeiros dias. Especialmente

	no início do período de cura, quando presente em forma cristalina, é o responsável pela rapidez da pega.
Ferroaluminato de cálcio (4 CaO.Al ₂ O ₃ .Fe ₂ O ₃ = C ₄ AF)	Constitui aproximadamente 5-15% da massa do clínquer. Contribui para a coloração cinza do cimento e também participa das reações de hidratação.

Fonte: Adaptado do Silva, 2020

A hidratação do cimento é um processo complexo que envolve várias mudanças quando o cimento anidro ou uma de suas fases constituintes entra em contato ou é misturado com a água. Esse fenômeno vai além da simples conversão de espécies químicas anidras em hidratos correspondentes (Taylor, 1997).

O silicato de cálcio hidratado (C-S-H) é o principal produto de hidratação de uma pasta de cimento, responsável pela sua resistência e durabilidade ao longo do tempo, constituindo de 50% a 60% do volume de sólidos da pasta (Mehta e Monteiro, 2014; Jennings, 2008). Em seguida, o segundo maior produto em quantidade é o hidróxido de cálcio (CH, também denominado como portlandita), representando de 20% a 25% do volume de sólidos da pasta de cimento. A portlandita tem uma área superficial menor que o C-S-H e contribui para a reação de autocura do cimento ao longo do tempo, fornecendo uma fonte adicional de ligante (Diamond, 2000; Mehta e Monteiro, 2014). O terceiro produto gerado pela hidratação do cimento é a etringita (trisulfoaluminato de cálcio hidratado - AFt), que compõe de 15% a 20% do volume sólido da pasta. A etringita desempenhe um papel secundário na microestrutura e nas propriedades da matriz, além disso, em algumas circunstâncias, pode tornar a matriz vulnerável ao ataque por sulfatos. Por fim, em menor quantidade, forma-se o monosulfoaluminato de cálcio hidratado (AFm). As fases adicionais apresentadas anteriormente, AFt e AFm, se formam devido à reação do C₃A e C₄AF com sulfatos presentes na água ou no solo, elas contribuem para o controle do tempo de pega e podem afetar a resistência e a durabilidade do cimento Portland em condições específicas (Mehta e Monteiro, 2014; Scrivener e Snellings, 2018).

Ressaltando que, ao longo do tempo de cura, as reações de aquecimento continuam a progredir, resultando no desenvolvimento gradual das propriedades mecânicas e físicas do cimento Portland. A taxa e a extensão dessas respostas são influenciadas por fatores como temperatura, umidade e composição química do cimento (Gonçalves, 2021).

Existem diversos tipos de cimento utilizados na construção civil, cada um com características específicas que atendem a diferentes necessidades e condições de aplicação. O cimento Portland comum, amplamente utilizado, é caracterizado pela presença de silicatos e aluminatos em sua composição, proporcionando resistência inicial e final ao concreto

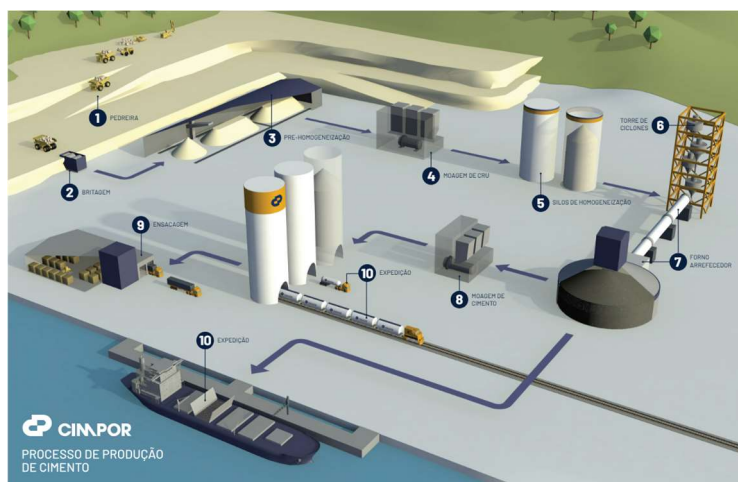
(Scrivener e Juilland, 2011). Além dele, há variantes como o cimento Portland de alta resistência inicial, o cimento Portland composto (com adições como escória de alto-forno ou pozolana), e o cimento Portland de alto forno, que utiliza escória como componente principal (Scrivener e Kirkpatrick, 2008). Essa diversidade permite a escolha do tipo mais adequado conforme as exigências estruturais, ambientais e econômicas de cada projeto de construção.

2.1.3. Impactos gerados na fabricação do cimento

Em 2021, a Fundação João Pinheiro, em colaboração com o Ministério do Desenvolvimento Regional, divulgou a estimativa do déficit habitacional no Brasil referente ao ano de 2019. Segundo o relatório, o déficit alcançou a marca de 5,876 milhões de domicílios, sendo que a grande maioria, cerca de aproximadamente 5 milhões, está concentrada em áreas urbanas. Esses números refletem a significativa demanda por moradias em todo o país, evidenciando a urgência de soluções para atender essa carência habitacional. Essa crescente necessidade de construção de novas residências também impulsiona a demanda por materiais de construção, como o cimento, tornando-o um recurso essencial na busca por soluções habitacionais no Brasil.

Para abordar os impactos ambientais e na saúde humana causados pela produção de cimento, é essencial compreender o processo produtivo desse material. Isso se deve ao fato de que a fabricação do cimento gera impactos em quase todas as duas etapas tornando fundamental uma análise do processo antes de discutir suas consequências para o meio ambiente e para a saúde das pessoas. Desse modo, a Figura 1 - Processo Produtivo da Indústria de cimento. Figura 1 descreve em 10 etapas esses processos.

Figura 1 - Processo Produtivo da Indústria de cimento



Fonte: Companhia Geral de Cal e Cimento, S.A. (CIMPOR, s.d.)

- Etapa 01 (PEDREIRA - Extração de matérias-primas): O calcário e outras matérias-primas são extraídos por perfuração e desmonte com explosivos, fornecendo carbonato de cálcio essencial para a produção de cimento;
- Etapa 02 (BRITAGEM): Após a extração, o material é triturado em britadores para reduzir seu tamanho de até 1000 mm para menos de 40 mm, facilitando o transporte para a fábrica;
- Etapa 03 (PRÉ- HOMOGENEIZAÇÃO): O material triturado e outras matérias-primas são empilhados em camadas para formar uma pilha de até 30000 t, onde são adicionados materiais de correção para obter a composição química desejada;
- Etapa 04 (MOAGEM DE CRU): O material pré-homogeneizado é moído em moinhos de bolas ou verticais, secado e reduzido ainda mais, formando a farinha crua, com possibilidade de adição de materiais de correção;
- Etapa 05 (SILOS DE HOMOGENEIZAÇÃO): A farinha crua é homogeneizada em silos equipados com fluidificadores, adquirindo a denominação de farinha;
- Etapa 06 (TORRE DE CICLONES): A farinha entra na torre de ciclones, onde é aquecida pelos gases quentes do forno, iniciando o processo de descarbonatação para formação de cal;
- Etapa 07 (FORNO/ARREFECEDOR – Produção de clínquer no forno rotativo): A farinha crua é introduzida no forno rotativo e cozida a 1450 °C, transformando-se em clínquer Portland através de reações físicas e químicas;
- Etapa 08 (MOAGEM DE CIMENTO): O clínquer é moído junto com gesso e adições para produzir cimento Portland, ajustando o grau de moagem conforme o tipo de cimento desejado;
- Etapa 09 (ENSACAMENTO): Após a moagem, o cimento é ensacado e pronto para distribuição em embalagens como sacos em paletes ou a granel;
- Etapa 10 (EXPEDIÇÃO): O cimento ensacado ou a granel é enviado para distribuição por rodovia, ferrovia, ou via fluvial ou marítima, conforme a necessidade.

Nas etapas iniciais do processo produtivo do cimento, há processos de produção que agride o meio ambiente de várias maneiras, inicialmente com a degradação do solo (degradação da fauna e flora) para extração de calcário e argila, culminando com modificações locais no ciclo das águas e a liberação de resíduos sólidos, líquidos e gasosos no meio ambiente. Durante o processo de fabricação de cimento, são liberados poluentes primários, incluindo material particulado, dióxido de carbono, óxidos de enxofre e óxidos de nitrogênio (Santi e Sevá Filho,

2004). A agência de proteção ambiental dos Estados Unidos (USEPA) regulamenta a emissão de poluentes atmosféricos perigosos (PAPs) provenientes da fabricação de cimento Portland por meio do documento *National Emission Standards for Hazardous Air Pollutants* (NESHAP). Entre os poluentes controlados estão os materiais particulados, hidrocarbonetos aromáticos policíclicos (HAPs) orgânicos, metais, mercúrio, gases ácidos e dioxina/furano (USEPA, 2025).

Segundo a Iniciativa para a Sustentabilidade do Cimento (CSI), as cimenteiras são responsáveis por aproximadamente 3% da emissão mundial de gases de efeito estufa e por aproximadamente 5% das emissões de CO₂ (CSI, 2002). Sabe-se que a etapa mais poluente se encontra no processo de clínquerização (forno rotativo), devido ao seu alto consumo de combustível fóssil para geração de energia. Uma vez que, de acordo com a World Business Council for Sustainable Development (WBCSD), cerca de 40% das emissões específicas da indústria do cimento nesse processo (WBCSD, 2002).

De acordo com Santos (2019), os impactos ambientais ainda continuam durante o processo de armazenagem, frete e no consumo, sendo os materiais particulados (poeira), os ruídos, combustíveis e descarte das embalagens, respectivamente aos processos.

2.2. MATERIAIS CIMENTÍCIOS SUPLEMENTARES (MCS)

Os Materiais Cimentícios Suplementares (MCS) são substâncias utilizadas como adições/substituição ao cimento e/ou agregados do cimento, proporcionando melhorias nas propriedades do concreto, sustentabilidade ambiental e eficiência na utilização de recursos. Esses materiais são geralmente subprodutos de outras indústrias ou resíduos que passam por processos adequados para se tornarem úteis na produção de concreto e argamassas (Abrão, 2019; Figueiredo, 2023).

Os Materiais Cimentícios Suplementares (MCS) podem ser classificados, principalmente, como filer ou pozolânicos. Os MCS do tipo filer atuam predominantemente como materiais inertes, que contribuem para o preenchimento dos vazios deixados pelos grãos de cimentos na pasta hidratada, melhorando a compacidade da matriz e influenciando propriedades como trabalhabilidade e densidade da pasta (De Brito, 2020). Já os MCS de natureza pozolânica reagem quimicamente com o hidróxido de cálcio (Ca(OH)₂) na hidratação do cimento Portland, formando compostos com propriedades cimentícias, como o silicato de cálcio hidratado (C-H-S) (NBR 12653, 2015; Moura et al., 2024).

Os MCS de natureza pozolânica podem apresentar como particularidade:

- **Pozolanicidade:** As pozolanas são materiais de natureza silicosa ou silicoaluminosa, que, isoladamente, não possuem reatividade suficiente para atuar como aglomerantes. No entanto, quando finalmente divididas e em contato com o cimento e a água, reagem com o hidróxido de cálcio liberado durante a hidratação do cimento. A maioria dos MCS possui características pozolânicas, os quais formam compostos adicionais que melhoram a resistência e a durabilidade do concreto. Exemplos comuns incluem cinzas volantes, sílica ativa, escória de alto forno e metacaulinita (Fernandes, 2018; Criado, Pagoto e Pereira, 2024);

- **Melhoria das propriedades mecânicas:** A adição de MCS pode aumentar a resistência à compressão do concreto, principalmente em idades avançadas, reduzindo também a permeabilidade e melhorando a durabilidade em ambientes agressivos (Nobre et al., 2022);

- **Redução da pegada de carbono:** A utilização de MCS contribui para a sustentabilidade ambiental, pois reduz a quantidade de cimento Portland necessária nas misturas de concreto, o que implica em menor consumo de energia na produção e menor emissão de dióxido de carbono (CO₂) (Nagireddi et al., 2024);

- **Compatibilidade e Dosagem:** A escolha do tipo e da dosagem adequada de MCS depende das características específicas da aplicação desejada, como resistência mecânica requerida, ambiente de exposição e teor de substituição do cimento (Nobre et al., 2022);

- **Aspectos Econômicos:** Além dos benefícios ambientais, a utilização de MCS pode resultar em economia de custos, especialmente quando são subprodutos de outras indústrias que precisam ser descartados ou tratados (Abrão, 2019).

Pillai, Gettu e Santhanam (2020) descrevem os benefícios e limitações do uso de MCSs em concreto armado. Os MCSs não comprometem a resistência à compressão a longo prazo nem a retração por secagem, embora possam afetar a trabalhabilidade e a resistência contra fissuras por retração plástica. Além disso, ao avaliar a taxa de penetração de cloretos no concreto e considerar o limite aceitável de cloretos, fica claro que os MCSs podem melhorar significativamente a vida útil do concreto sob ataque de cloretos. Embora haja uma redução na resistência à carbonatação, os MCSs desempenham um papel crucial na redução da pegada de carbono do concreto.

A norma NBR 12.653: Materiais pozolânicos - Requisitos (ABNT, 2015) determina os requisitos para materiais pozolânicos destinados ao uso com cimento Portland em concreto, argamassa e pasta. Além disso, ela classifica os materiais pozolânicos em:

- Classe N:
 - Pozolanas naturais, como os materiais de origem vulcânica, geralmente de caráter petrográfico ácido ou de origem sedimentar com atividade pozolânica, como os cherts silicosos e as terras diatomáceas.
 - Pozolanas artificiais, que provêm de tratamento térmico ou subprodutos industriais, como argilas calcinadas.
- Classe C:
 - Pozolanas artificiais, como as cinzas volantes produzidas pela queima de carvão mineral em usinas termoelétricas.
- Classe E: Abrange quaisquer pozolanas que não coincidam com as citadas nas classes anteriores.

2.3. RESÍDUOS SÓLIDOS

2.3.1. GERAÇÃO DE RESÍDUOS SÓLIDOS E PREJUÍZOS AO MEIO AMBIENTE

Segundo Rocha (2017), entre os diversos desafios ambientais enfrentados, destaca-se o desafio do aumento na quantidade de resíduos sólidos. Nunca na história registrou-se uma acumulação tão significativa de “lixo” ou resíduos sólidos, uma realidade impulsionada pelo crescimento urbano e pela crescente relevância das cidades na estrutura social.

De acordo com a NBR 10004 Resíduos sólidos – Classificação (ABNT, 2004), os resíduos sólidos e semissólidos originam-se de uma variedade de atividades, como as industriais, domésticas, hospitalares, comerciais, agrícolas, de serviços e de limpeza urbana. Esta categoria abrange também os lodos resultantes de processos de tratamento de água, bem como aqueles gerados em dispositivos e instalações de controle da poluição. Além disso, engloba certos líquidos com características específicas que não podem ser descartados na rede de esgoto público ou corpos d'água, ou que demandam soluções técnicas ou econômicas impraticáveis com a tecnologia disponível.

Resíduos referem-se a todos os materiais gerados durante um processo que não constituem o objetivo econômico principal dele, são inerentes a qualquer processo envolvendo materiais. Enquanto alguns resíduos são perigosos e muito estáveis a longo prazo, outros degradam-se rapidamente. No entanto, em condições anaeróbicas típicas de aterros, alguns resíduos contribuem para as mudanças climáticas ao gerar metano, um gás com potencial de aquecimento global 25 vezes maior do que o CO₂ (John, 2017).

Segundo a Associação Brasileira de Resíduos e Meio Ambiente (ABREMA), em 2022, calcula-se que cada brasileiro tenha produzido em média 1,04 kg de Resíduos Sólidos Urbanos (RSU) por dia. Considerando a população brasileira divulgada pelo Censo Demográfico 2022, estima-se que aproximadamente 77,1 milhões de toneladas de RSU foram geradas no país ao longo do ano. Isso equivale a mais de 211 mil toneladas de resíduos produzidos diariamente ou cerca de 380 kg por habitante ao longo do ano (ABREMA, 2023).

De acordo com o Sistema de Estimativas de Emissões de Gases de Efeito Estufa (SEEG), o setor de resíduos no Brasil emitiu mais de 91 milhões de toneladas de dióxido de carbono equivalente (CO₂e) em 2022. Essas emissões representaram aproximadamente 5,41% de todas as emissões de gases de efeito estufa do país naquele ano (SEEG, 2024).

2.4 CARACTERÍSTICAS E PROPRIEDADES DAS MATERIAS PRIMAS E PASTAS DE CIMENTO

A eficácia das adições minerais está diretamente vinculada à sua composição química, ao nível de amorfismo, à granulometria e à quantidade empregada (Matos e Guimarães, 2017). Por isso, é necessário realizar diversos ensaios, incluindo: a determinação da composição química e da granulometria das matérias-primas, o estudo da hidratação das pastas, a avaliação da absorção de água e os testes de resistência à compressão.

Granulometria

A granulometria a laser é uma técnica busca como resultados gráficos que mostram a distribuição de tamanhos das partículas. O conhecimento da granulometria é fundamental uma vez que a influência diretamente na rapidez da hidratação, reação, incremento de resistência com a idade, área superficial, entre outras (Toledo, 2016).

Os ensaios de granulometria a laser de Maciel (2023) mostram que o tempo e a velocidade de beneficiamento influenciam significativamente na redução do tamanho das partículas e no aumento da área de superfície específica dos materiais analisados. Para o cascalho de perfuração da 1ª camada, a moagem entre 200 e 300 rpm por até 20 minutos reduziu drasticamente o D50% de 2075,66 µm (sem moagem) para até 7,64 µm, com aumento da área superficial de até 774,91 m²/kg. Moagens a 300 rpm por 10 a 20 minutos mostraram melhores resultados, com distribuição granulométrica mais fina e estável.

Composição química

A composição química pode influenciar diretamente as reações de hidratação do cimento e a formação dos produtos hidratados, a durabilidade da matriz cimentícia em longo prazo, a demanda de água. Além disso, a composição química pode ser uma ferramenta importante para o controle de qualidade das matrizes cimentícias, monitorá-la pode permitir a detecção de possíveis desvios e o ajuste da mistura para manter a qualidade, além de termos uma visão dos elementos químicos que compõem os materiais. (Pollnow et al., 2012; Farias, 2022; Pereira et al., 2020; Bueno, 2020).

Para identificar a composição química elementar dos materiais pode-se utilizar a fluorescência de Raios X (FRX). Os elementos das amostras expostos aos raios X emitem fluorescência, o que permite a identificação e quantificação dos elementos. Ribeiro et al., (2021) identificou por meio do ensaio de FRX em uma amostra estudada contendo mais de 50% de cálcio (Ca) e teores de ferro (Fe), potássio (K) e silício (Si) entre 5% e 50%, com traços de outros elementos. A presença de Fe, Al e Si promove reações pozolânicas, ajudando a consumir a portlandita (Ca(OH)_2) livre e melhorando as reações de hidratação do cimento. Comparações com cinzas a 500 °C mostram que possuem 68,6% de óxidos pozolânicos e um índice de atividade pozolânica de 77,5%, atendendo aos requisitos da NBR 12653 (ABNT, 2014).

Estudo da hidratação das pastas

O estudo da hidratação das pastas é fundamental para compreender o desenvolvimento de suas propriedades ao longo do tempo. As reações de hidratação do cimento envolvem a transformação dos componentes anidros (C_3S , C_2S , C_3A , C_4AF) por componentes como o silicato de cálcio hidratado (C-S-H), o hidróxido de cálcio (CH) e o trissulfato de alumínio hidratado ou etringita (AFt). A adição de materiais cimentícios suplementares (MCS) pode alterar essas ligações e a composição dos produtos formados. Desse modo, a hidratação das pastas pode ser estudada com a utilização de técnicas como a Espectroscopia no Infravermelho com Transformada de Fourier (FTIR), a Difração de Raios-X (DRX) e a análise térmica (TG/DTA).

O estudo de Rodrigues (2012) mostrou na análise de DRX que as cinzas de palha de cana-de-açúcar têm fases cristalinas, além disso, possuem fase amorfa, de acordo com halo encontrado no difratograma nos ângulos 2θ , entre 20° e 30°, o que aponta possível reatividade das amostras. Além disso, o ensaio mostrou que em algumas pastas com cimento e cinzas. Os valores de somatória das áreas dos picos de portlandita foram menores quando comparados à pasta de referência, indicando o elevado consumo de portlandita (Ca(OH)_2) e, conseqüentemente, a maior formação de produtos hidratados.

Maciel (2023) apresentou os resultados dos ensaios de FTIR das pastas de cimento contendo cascalho de perfuração de poços de petróleo, os quais indicaram tendência semelhante aos ensaios de DRX, onde as fases majoritárias encontradas foram etringita, portlandita, calcita e quartzo. Foi identificado ainda a presença das fases C-S-H e carbonatos amorfos, que não foram identificáveis no DRX por não serem cristalinos.

A Análise Termogravimétrica (TG) e a Análise Diferencial de Calorimetria (DTA) são técnicas usadas no estudo das propriedades térmicas das matrizes cimentícias. Na análise térmica a localização do pico de desidroxilação é predominantemente influenciada pelo tipo de estrutura e pelas ligações das hidroxilas. Por outro lado, a forma e a largura do pico estão mais relacionadas à cristalinidade ou à distribuição do tamanho das partículas do material. O tamanho do pico também reflete a quantidade de hidroxilas originalmente presente na estrutura (Fernandez, Martirena, e Scrivener, 2011).

Em sua pesquisa de Doutorado sobre a microestrutura de pastas de cimento Portland com nanossílica coloidal e adição mineral altamente reativas, Andrade (2017) constatou que, de acordo com os resultados de DRX e TG/DTA, a reação pozolânica da nanossílica consome mais hidróxido de cálcio ou portlandita ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) nos primeiros 3 dias de hidratação. Em contraste, o impacto das adições minerais altamente reativas na atividade pozolânica é mais evidente a partir do 7º dia de hidratação. Quando a nanossílica é combinada com essas adições minerais reativas, observa-se um efeito combinado no consumo de hidróxido de cálcio tanto nos primeiros 3 dias quanto após 7 dias.

Absorção de água por imersão

Alguns materiais podem ser utilizados para melhorar a absorção de água das matrizes cimentícias, por exemplo, a utilização de sílica ativa como adição pozolânica em concreto melhora suas propriedades ao preencher vazios entre as partículas de cimento, reduzindo a porosidade e, conseqüentemente, a absorção de água. Isso diminui a probabilidade de manifestações patológicas, pois reduz a entrada de água e substâncias agressivas (Arruda, 2018).

Segundo o ensaio de absorção de água por imersão de Reis et al., (2019) as argamassas com 20% de Resíduo de Construção e Demolição (RCV) apresentaram maior absorção de água em comparação com a argamassa de referência, apesar de serem mais resistentes. Isso ocorre porque a porosidade total das misturas com 20% de RCV é maior, sugerindo que possuem um maior volume de poros pequenos, sem comprometer a resistência. Por outro lado, as misturas

de referência (0% RCV) e com 10% de RCV têm menor porosidade total, mas com maior volume de poros grandes, o que pode influenciar na resistência do material.

Resistência à compressão

O estudo da resistência à compressão em amostras com substituição parcial do cimento é fundamental para avaliar os impactos dos materiais suplementares na capacidade do concreto de suportar as cargas, garantindo a qualidade, segurança e durabilidade das estruturas construídas (Carvalho, Silva, Diodato, 2025).

Lima (2023), aborda o desempenho de composições ternárias com substituição parcial do cimento Portland por resíduos de construção e demolição (RCD) e metacaulim (MK), com resistências à compressão entre 36 e 55 MPa aos 28 dias. A formulação com 40% de RCD e 10% de MK apresentou redução significativa de resistência, chegando a 36 MPa, enquanto composições com menores teores de RCD (5-10%) e maior proporção de MK mantiveram resistência equivalente à mistura com 50% de MK, atingindo cerca de 50 MPa. Esses resultados atendem à regulamentação brasileira, a NBR 16697:Cimento Portland – Requisitos (ABNT,2018), que permite a adição de até 50% de pozolanas, e evidenciam o potencial do uso de RCD como material de enchimento ou pozolana ecoeficiente em matrizes cimentícias.

2.5 APROVEITAMENTO DE RESÍDUOS SÓLIDOS EM MATRIZES CIMENTÍCIAS

Acomodar resíduos em aterros concentra problemas de contaminação ambiental, além de outros transtornos ao ambiente. Por isso, ignorar os resíduos e dispô-los em lugares inapropriados não é mais suficiente. Na perspectiva do uso eficiente de recursos naturais, é importante utilizá-los como matérias-primas em substituição aos recursos naturais (John, 2017). Podendo diminuir a quantidade de resíduos enviados para aterros sanitários e a ameaça de poluição ambiental e preservar os recursos naturais, diminuindo a extração de matérias-primas essenciais para a fabricação do cimento (Feire e Beraldo, 2013).

Existe uma grande quantidade de publicações sobre resíduos com potencial de aplicação em matrizes cimentícias (Lopes, 2023). Além disso, de acordo com a WBCSD (2016), cerca de 11% da massa do cimento mundial e 16,3% da massa do cimento brasileiro é constituída de escória de alto forno e cinzas volantes, os quais são resíduos. (WBCSD CEMENT SUSTAINABILITY INITIATIVE, 2016, apud John, 2017). Dentre essas publicações pode-se destacar algumas, como:

➤ RESÍDUOS DE CONSTRUÇÃO E DEMOLIÇÃO (RCD)

O estudo de Silva et al. (2020) analisou a viabilidade técnica, ambiental e econômica do uso de resíduos de construção e demolição (RC&Ds) como agregados alternativos na produção de concreto, visando à sustentabilidade e à redução de impactos ambientais. A metodologia consistiu em uma revisão sistemática da literatura, com foco em estudos que avaliaram a substituição de agregados naturais por RC&Ds em diferentes proporções. Diversos ensaios foram utilizados, como resistência à compressão, absorção de água, composição granulométrica, massa específica, espectrometria de fluorescência de raios X (FRX) e testes de durabilidade, incluindo penetração de cloretos. Os resultados indicaram que a substituição parcial de agregados por RC&Ds é tecnicamente viável, atendendo às normas brasileiras, especialmente em proporções de até 50%, e pode ser aplicada na fabricação de blocos de concreto, concreto espumado e geopoliméricos. Apesar de algumas limitações, como maior absorção de água e menor módulo de elasticidade, os RC&Ds contribuíram para a redução do impacto ambiental, menor consumo de recursos naturais e menores emissões de CO₂, sendo uma alternativa promissora para a construção sustentável.

Lima (2023) aborda a utilização de finos de resíduos de construção e demolição (RCD) como pozolana ecoeficiente em matrizes cimentícias binárias e ternárias, destinadas a produção de placas finas delgadas. Mostra que os finos de RCD, após processamento, apresentaram baixa pozolanicidade e características típicas de materiais cimentícios, podendo substituir parte do cimento Portland, melhorando propriedades físicas, mecânicas e microestruturais das misturas. A adição de RCD em combinação com metacaulim em mistura ternária, reduz a absorção de água e fortalece a estrutura dos compósitos cimentícios, contrabalançando efeitos adversos como a carbonatação acelerada.

Aquino (2024) realizou a caracterização de resíduos recicláveis da construção civil, incluindo gesso, agregados reciclados, papelão/papel, madeira e sólidos contaminados. A pesquisa teve como foco avaliar o potencial reativo dos resíduos recicláveis para aplicação na indústria do cimento, com ênfase em sua viabilidade técnico-química e ambiental, com ensaios como DRX, FRX, PF, finura, umidade, teor de cloreto e índice de atividade pozolânica. Foram realizados ensaios como Difração de Raios X (DRX), Fluorescência de Raios X (FRX), perda ao fogo (PF), determinação de finura, umidade, teor de cloretos e índice de atividade pozolânica. Os resultados da análise por FRX indicaram que os agregados reciclados possuem alto teor de sílica (SiO₂) e baixo teor de óxido de cálcio (CaO), o que permite sua utilização como substitutos de matérias-primas e do clínquer.

➤ RESÍDUOS AGROINDUSTRIAIS

Aquino (2021) faz uma revisão literária sobre incorporação de cinzas de resíduos agrícolas em matrizes cimentícias, destacando diversos estudos que mostram que a substituição parcial do cimento por resíduos agroindustriais, com foco e sua influência nas propriedades do concreto, especialmente em relação à problemas de durabilidade frente a ataques por cloretos e carbonatação. Com isso destaca-se alguns estudos, apresentados no Quadro 1:

Quadro 1 - Estudos sobre utilização de resíduos agrícolas como adições minerais em matrizes cimentícias

Artigo	Resíduo Avaliado	Técnicas de Caracterização	Principais Achados
Ramachandran et al. (2018)	Cinza de esterco de vaca	DRX (método Bragg-Brentano)	Substituição de 15% do cimento melhorou a resistência à compressão e tração e reduziu a degradação em contato com água doce.
Qudoos et al. (2018)	Cinza da palha de trigo	TGA, FTIR, DRX, MEV	Substituição de 20% resultou em maior resistência à compressão e maior densificação da microestrutura.
Praveenkumar et al. (2020)	Cinza de bagaço da cana-de-açúcar	DRX, FTIR, FRX, MEV	Substituição de 10% reduziu permeabilidade e aumentou resistência mecânica.
Hossain et al. (2020)	Escória, CV, cinza de óleo de palma, cinza de casca de arroz	DRX	Argamassas com resíduos apresentaram resistência à compressão menor, mas resistência à corrosão semelhante ao cimento comum.
Agrawal et al. (2019)	Cinza de casca de arroz e microssílica	FRX	Substituição (5–30%) melhorou resistência, reduziu carbonatação e permeabilidade, com preenchimento dos poros.
Moretti; Nunes; Sales (2018)	Cinza de bagaço da cana-de-açúcar	Não informado	Substituição de 30% mostrou bom desempenho mecânico e durabilidade, sendo útil como material de enchimento.
Ameri et al. (2019)	Cinza de casca de arroz	MEV	Substituições até 30% melhoraram resistência, diminuíram porosidade e permitiram concreto autoadensável de alta performance.
Fuller et al. (2018)	Cinza volante do pó de madeira	DRX, MEV	Melhora na hidratação, resistência mecânica e ligação interna devido à retenção de água e preenchimento dos vazios.

Fonte: Adaptado de Aquino, 2021.

➤ CINZAS DA CASCA DE ARROZ

Silva (2020) estudou a viabilidade técnica e ambiental da substituição parcial (10%) do cimento Portland por cinza de casca de arroz (CCA) em pastas de cimento, utilizando diferentes dosagens de dois aditivos químicos – superplastificante e modificador de viscosidade – com foco em propriedades reológicas e resistência mecânica. Foram realizados ensaios de reometria oscilatória e rotacional, mini-slump, escoamento no Funil de Marsh e resistência à compressão. Os resultados indicaram que a CCA contribuiu para o aumento da resistência à compressão ($\approx 29,4\%$ aos 7 dias e $\approx 16,06\%$ aos 28 dias), com bom desempenho reológico, comportamento pseudoplástico e tixotrópico, além de manter a trabalhabilidade sem segregação. A formulação ideal apresentou módulo elástico de 1630 Pa, tensão de escoamento de 16 Pa, viscosidade plástica de 0,19 Pa.s e recuperação tixotrópica de 65%. A CCA, mesmo com granulometria inferior ao ideal e característica predominantemente cristalina, mostrou-se eficiente como material de enchimento (efeito filer), sendo uma alternativa sustentável para reduzir o uso de cimento e o impacto ambiental.

Zottis, Possan e Hasparyk (2023), pesquisaram sobre o potencial de autocicatrização de argamassas especiais com adição de agentes biológicos, aditivo autocicatrizante e casca de arroz. Foram estudadas diferentes formulações, incluindo uma referência com aditivos convencionais e outras com bactérias *Bacillus subtilis* AP91 incorporadas à casca de arroz. Os resultados mostram que os agentes autocicatrizantes contribuem para o fechamento parcial de fissuras ao longo do tempo, com aberturas menores que 0,25 mm. As argamassas com casca de arroz apresentaram aumento significativo na resistência mecânica após 120 dias, comparáveis às formulações sem bio-agregados. Conclui-se que os agentes biológicos têm potencial promissor para aplicação em matrizes cimentícias, requerendo estudos adicionais para otimização na construção sustentável.

➤ BAGAÇO DE CANA-DE-AÇÚCAR

Figueiredo (2023) investigou o efeito da adição de cinza do bagaço de cana-de-açúcar (CBCA) na durabilidade e desempenho de argamassas álcali-ativadas, especialmente quanto à reação álcali-agregado (RAA) e ao ataque ácido. Foram realizados ensaios de expansão por RAA, perda de massa em meio ácido, resistência à compressão e à flexão, além de análises por microscopia eletrônica de varredura. Os resultados mostraram que as argamassas com CBCA apresentaram melhor desempenho frente à RAA, com menor expansão (0,064% com 30% de CBCA) em comparação à argamassa convencional com cimento Portland (0,635%). Frente ao ataque ácido, também apresentaram menor perda de massa, além de uma relação inversa entre

absorção de água e resistência mecânica. A mistura com 30% de CBCA (CBCA30) destacou-se, apresentando os melhores resultados globais, com resistência à compressão de 51 MPa e à flexão de 9 MPa, sendo viável para uso estrutural e uma alternativa sustentável ao cimento convencional.

➤ CASCALHO DE PERFURAÇÃO (CAP) DE POÇOS DE PETRÓLEO

Maciel (2023) avaliou o cascalho de perfuração (CAP) de poços de petróleo como materiais cimentícios suplementares (MCS). Focou na substituição parcial do cimento Portland V (CPV) por CAP1 e CAP2 em teores variados (5% a 30%) na produção de pastas de cimento. Os resultados mostraram que o CAP1 melhorou a cinética de hidratação das pastas ternárias de cimento em comparação com as pastas de referência, alcançando pelo menos 70% da resistência das pastas de referência após 28 dias. Este estudo indicou que o CAP1 e CAP2 podem ser utilizados eficazmente como materiais suplementares em matrizes cimentícias, proporcionando benefícios econômicos e ambientais ao reduzir o uso de recursos minerais como argila e calcário.

➤ GEOPOLÍMEROS

Almeida (2023) investigou o desempenho de geopolímeros como substitutos do cimento Portland, visando reduzir os impactos ambientais da produção de cimento. Utilizando metacaulim, escória de alto forno e solução alcalina, foram desenvolvidas pastas, argamassas e concretos geopoliméricos. Os resultados mostraram que a pasta alcançou 36,5 MPa de resistência à compressão com 35% de escória, e a argamassa atingiu 41,15 MPa com 40% de areia. O concreto geopolimérico alcançou 41,8 MPa de resistência à compressão e 4,87 MPa de tração na flexão, superando o desempenho do cimento Portland em até 21,16%. Esses resultados evidenciam o potencial dos geopolímeros para aplicações que demandam altas resistências mecânicas iniciais, promovendo sustentabilidade na construção civil.

➤ CINZAS VOLANTES

Costa et al. (2023) investigou o uso do combinado de cinza volante e cinza pesada em pastas álcali-ativadas. Observou-se que a adição de até 50% de cinza pesada melhorou a trabalhabilidade e retardou a pega das pastas. Entretanto, a resistência mecânica tendeu a diminuir com o aumento do teor de cinza pesada, embora uma mistura com 100% de cinza pesada tenha alcançado 14,4 MPa. Análises químicas e microestruturais confirmaram a formação do gel N-A-S-H como produto principal. Conclui-se que a combinação de cinza

volante e cinza pesada mostra potencial para aplicações em álcali-ativação, valorizando subprodutos industriais.

Silva e Lopes (2022) pesquisaram sobre o uso de cinzas volantes (CV1 e CV2), oriundas da combustão de carvão mineral em duas usinas termelétricas de Candiota-RS, como substituintes parciais do cimento Portland em matrizes cimentícias, com foco na caracterização física, química e mineralógica. As substituições propostas não indicaram percentuais específicos aplicados em misturas, concentrando-se na caracterização prévia do material. A CV1 apresentou 65,08% de amorfismo, com partículas esféricas de aluminossilicatos (mulita), sílica amorfa e hematita, diâmetro médio de 42,19 μm e área específica de 23,04 m^2/g , sendo classificada como pozolana ativa. Já a CV2 apresentou 35,49% de amorfismo, partículas irregulares de sílica cristalina, hematita e calcita, com maior porosidade, diâmetro médio de 21,25 μm e área específica de 35,6 m^2/g , sendo considerada pouco reativa. Os ensaios utilizados incluíram MEV, DRX, SSA, distribuição granulométrica e isotermas de adsorção/dessorção. Constatou-se que somente a CV1 apresenta potencial pozolânico efetivo, podendo contribuir para o aumento da resistência mecânica em idades superiores a 28 dias, enquanto a CV2 tende a reduzir a trabalhabilidade e não contribui significativamente para o desempenho da matriz.

➤ RESÍDUOS DE CARVÃO VEGETAL

O estudo de Reis, Serra e Zampieron (2019) avaliaram a viabilidade técnica da utilização de resíduos de carvão vegetal (RCV) como substituto parcial da areia fina em argamassas, com teores de substituição de 0%, 10%, 20% e 30%. O RCV passou por beneficiamento e caracterização química, revelando composição rica em óxidos como CaO (2,01%), K₂O, MgO, P₂O₅ e Fe₂O₃ representando cerca de 50% do conteúdo total, o que lhe confere potencial pozolânico. Foram realizados ensaios de pH, análise granulométrica, massa específica, massa unitária, absorção de água, teor de umidade e resistência à compressão axial. A substituição com RCV resultou em redução da densidade das argamassas de 2107,8 kg/m^3 (0% RCV) para 1441,9 kg/m^3 (30% RCV), representando uma queda de 31,61%. Nos ensaios de compressão, aos 28 dias, todas as composições com RCV apresentaram resistência superior ou equivalente à amostra padrão, atingindo valores próximos a 29 MPa. Os resultados indicam que a substituição parcial da areia por RCV é tecnicamente viável, especialmente para aplicações não estruturais.

Ribeiro et al. (2021) estudou o uso de cinza granulada (CG) de biomassa proveniente de resíduos de carvão vegetal amazônico como substituição parcial do cimento Portland (CP II-F 40) em argamassas, nos teores de 0%, 5% e 10%. A CG apresentou composição de 68,6%

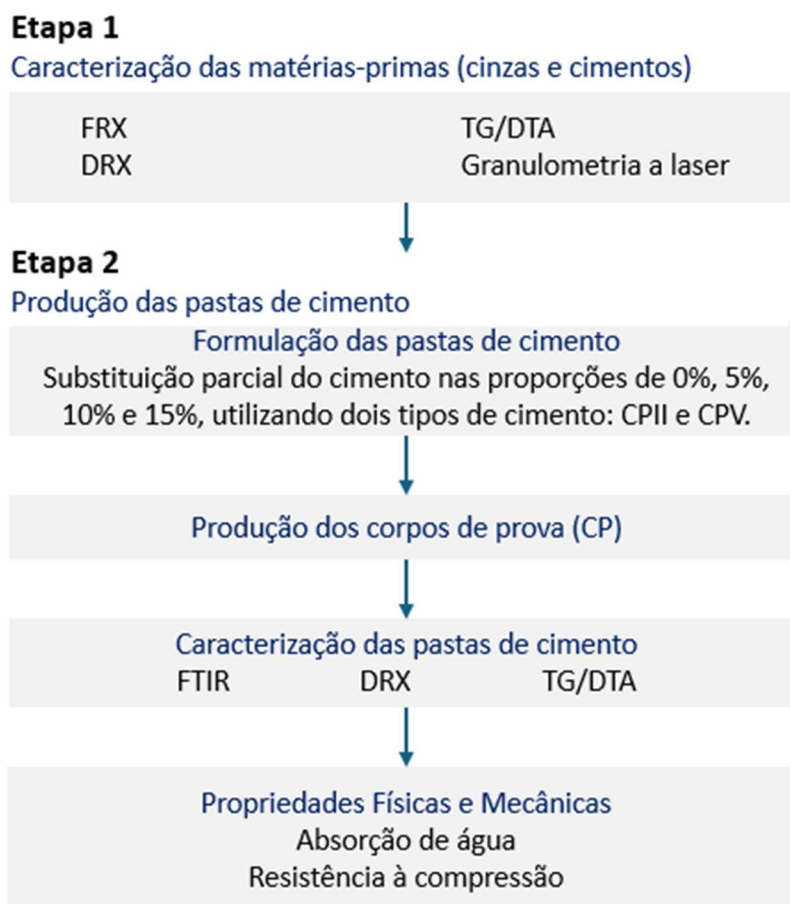
de óxidos pozolânicos (SiO_2 , Al_2O_3 , Fe_2O_3), caracterizando-a como material pozolânico classe E. Foram realizados ensaios de absorção de água total e por capilaridade, volume de vazios, massa específica, resistência à compressão axial, tração por compressão diametral, perda ao fogo, tempo de pega, FRX e TG/DTG. A substituição de 10% resultou em aumento de aproximadamente 5% na resistência à tração e redução na absorção de água e porosidade, indicando maior estabilidade microestrutural, enquanto a de 5% apresentou maior variabilidade e queda de desempenho mecânico. O compósito com 10% de CG também mostrou maior perda ao fogo (14,71%) e retardo de 35,2% no início de pega, sugerindo influência na cinética de hidratação.

Mossmann (2024) investigou argamassas com substituição parcial do cimento Portland por resíduos de cerâmica vermelha (fino de tijolo – FT) e carvão vegetal (CV), nas proporções de 5%, 10% e 20% de FT e 5% de CV, resultando em misturas com 5%, 10%, 20% e 25% de substituição total em massa. Foram analisadas a composição química dos materiais (teores elevados de SiO_2 , Al_2O_3 e Fe_2O_3 no FT, e presença de C e K_2O no CV), e realizados ensaios de resistência à compressão, absorção por capilaridade e índice de vazios, aos 28 dias. A substituição de 25% (20% FT + 5% CV) resultou em um aumento de 12,5% na resistência à compressão em relação à argamassa de referência, além de redução de 3,3% na densidade e aumento do índice de vazios e absorção, evidenciando a viabilidade do uso combinado dos resíduos.

3. PROGRAMA EXPERIMENTAL

Esse capítulo descreve os materiais e métodos utilizados de acordo com as etapas realizadas no estudo. O programa experimental (Figura 2) investigou a utilização de resíduos de cinzas de carvão de churrasqueira (CCC) em matrizes cimentícias suplementares realizando a produção de pastas de cimento para a verificar as propriedades físicas, químicas, mineralógicas e mecânicas.

Figura 2 - Fluxograma do programa experimental



Fonte: Autora (2025)

A pesquisa foi dividida em duas etapas principais. A primeira etapa consistiu na caracterização das matérias-primas empregadas, utilizando-se ensaios físicos, como a granulometria a laser; ensaios químicos, como fluorescência de raios X (FRX) e análise térmica simultânea (TG/DTG e DTA); além de ensaio mineralógico por difração de raios X (DRX).

Na segunda etapa, foram produzidas pastas de cimento com substituição parcial do cimento por cinzas provenientes da queima do carvão de churrasqueira (CCC), nas proporções

de 0%, 5%, 10% e 15%, utilizando dois tipos de cimento: CII e CPV. Após a moldagem dos corpos de prova (CPs), foram realizados ensaios para caracterização das amostras finais, incluindo FTIR, DRX e TG/DTA. Além de ensaios físicos e mecânicos, como absorção de água por imersão e resistência à compressão.

O Quadro 2 detalha a aplicação, o objetivo e as expectativas para cada ensaio realizado:

Quadro 2 - Descrição dos ensaios realizados e resultados esperados

Ensaio	Objetivo	Expectativas / Resultados Esperados
ETAPA 01		
FRX	Determinar a composição química.	Identificação de óxidos.
DRX	Identificar as fases cristalinas antes da hidratação e grau de cristalinidade.	Avaliar presença de possíveis fases cristalinas.
TG/DTA	Avaliar perdas de massa, comportamento térmico e curva termodiferencial.	Identificar água livre, matéria orgânica residual, desidroxilação descarbonatação e transição de fases.
Granulometria a laser	Determinar a distribuição de tamanho de partículas.	Avaliar se a cinza é fina o suficiente para efeito fíler ou se necessita de moagem.
ETAPA 02		
FTIR	Identificar grupos funcionais e ligações químicas. Verificar mudanças químicas após hidratação.	Observar a presença de reatividade ou estabilidade química. Formação de novos produtos de hidratação (CSH, carbonatos e etc.).
DRX	Identificar as fases cristalinas depois da hidratação e grau de cristalinidade.	Avaliar presença de possíveis fases cristalinas. Redução de fases reativas, surgimento de novos compostos da reação cimento-cinza.
TG/DTA	Avaliar perdas de massa, comportamento térmico e curva termodiferencial.	Identificar água livre, matéria orgânica residual, desidroxilação descarbonatação e transição de fases.
Absorção por imersão	Verificar a absorção total de água da amostra.	Espera-se absorções de água das substituições inferiores ou iguais as da amostra de referência.
Resistência à compressão	Avaliar a resistência mecânica dos CPs.	Espera-se um aumento na resistência com a incorporação das cinzas ou que não haja perda considerável de resistência.

Fonte: Autora (2025)

3.1 MATERIAIS

3.1.1. Cimento

Os cimentos a serem empregados na pesquisa foram o cimento Portland composto com fíler (CPII F) e o cimento Portland de alta resistência inicial CPV-ARI, fornecido pela marca CIPLAN.

A escolha do cimento Portland tipo V de alta resistência inicial (CPV) baseou-se na sua disponibilidade local, ampla utilização na fabricação de pré-moldados e composição isenta de escória ou materiais pozolânicos, o que permite investigar de maneira mais precisa os efeitos da adição de cinzas à mistura. Além disso, foi utilizado o cimento Portland tipo II (CPII), considerando a sua disponibilidade em Barreiras e ampla utilização na construção civil. O CPII pode apresentar redução da permeabilidade e oferece resistência a sulfatos, características essenciais para diversas aplicações na construção.

3.1.2. Cinza de carvão de churrasqueira

As cinzas de carvão de churrasqueira (CCC) são subprodutos resultantes da queima de carvão vegetal produzidos e adquiridos em carvoarias.

As CCC que foram utilizadas neste estudo foram obtidas no estabelecimento comercial bar e restaurante do Peixe, situado em Barreiras, em Bahia, Brasil. O local utiliza o carvão vegetal para preparo de tipos variados de carnes, gerando uma quantidade contínua de resíduos sólidos. Após o uso, os resíduos foram deixados no interior da churrasqueira para arrefecimento natural à temperatura ambiente, sem adição de água ou qualquer outro método de resfriamento forçado, para melhor preservação das características originais das cinzas (Figura 3).

O material foi coletado após o completo arrefecimento natural com uma pá metálica limpa e luvas de proteção, prevenindo o contato direto com o material. As cinzas foram depositadas em recipientes plásticos do tipo balde com tampa, previamente higienizados com álcool 70%. Após a coleta os recipientes foram transportados para o laboratório, localizado em ambiente limpo, ventilado e coberto, onde foram armazenados até o início do processo de preparo da amostra.

Figura 3 - Resíduos de carvão da churrasqueira do estabelecimento Bar do Peixe



Fonte: Autora (2025)

Para o preparo do material, as cinzas passaram por duas etapas de peneiramento sequencial que foram previamente limpas com pano seco. Inicialmente, as CCC foram submetidas a um processo de peneiramento com peneira manual de construção civil, comumente usadas por pedreiros (com malha de aproximadamente 2 mm) (Figura 4a), a fim de remover detritos grosseiros, resíduos alimentares, carvão parcialmente queimado e fragmentos maiores. Em seguida, foram submetidas a um peneiramento fino com malha de 0,075 mm (Figura 4b), com o objetivo de remover impurezas restantes, facilitando assim a sua preparação e utilização.

Figura 4 - Amostras de cinza de carvão de churrasqueira a) sem peneiramento e b) com peneiramento



(a)

(b)

Fonte: Autora (2025)

Importante destacar que não foi realizada qualquer etapa de moagem ou britagem da matéria prima nesse estudo. Isso se deve ao fato de que, dentre as cinzas coletadas, não havia somente fragmentos de carvão parcialmente queimado, mas também resíduos alimentares provenientes do preparo de carnes.

3.1.3. Água

A água a ser empregada nas pastas foi fornecida pela Empresa Baiana de Águas e Saneamento S.A (Embasa), através de sua rede de abastecimento local.

A água participa quimicamente nas relações de hidratação, formando produtos que conferem resistência ao material cimentício, e proporciona a trabalhabilidade necessária para a aplicação desse material. Embora uma maior quantidade de água favoreça a hidratação e reduza a porosidade, o excesso de água pode resultar em aumento da porosidade no material endurecido, o que compromete negativamente suas propriedades mecânicas e sua durabilidade (ABRÃO,2019).

3.2 ETAPA 1 – CARACTERIZAÇÃO DAS MATERIAS-PRIMAS (CINZAS E CIMENTOS CPII E CPV)

3.2.1. Granulometria a laser

A granulometria a laser é uma técnica de análise que utiliza a difração da luz para medir a distribuição do tamanho das partículas em uma amostra. Essa técnica determina a porcentagem em peso de cada faixa de tamanho de grãos em relação à massa total da amostra, proporcionando uma análise precisa da granulometria (Toledo, 2016). O processo envolve a preparação da amostra, a incidência de um feixe de laser, a detecção da luz difratada e a análise dos dados, resultando em gráficos que mostram a distribuição de tamanhos.

A distribuição de tamanho das partículas dos cimentos (CPV e CPII) e da cinza foi através de medidas determinada difração a laser em Mastersizer 3000 (Malvern), com acessório AERO S localizado no Laboratório de Nano materiais do CIENAM/UFBA.

3.2.2. Composição química

A composição química foi determinada por Espectrometria de Fluorescência de Raio X (FRX), por meio da utilização do equipamento S8 Tiger da Bruker localizado no Laboratório Multitarefa (Labmulti) do CIENAM/UFBA.

A análise por Fluorescência de Raios X (FRX) consiste na detecção dos fótons de raios X emitidos pelos elementos presentes na amostra quando excitados por uma fonte de radiação de elevada energia, a qual possibilita a entrada de fótons de raios-X que atingem os elétrons. Essa técnica permite identificar os elementos químicos e suas concentrações na amostra. Após essa etapa, a composição química é ajustada pelo índice de perda ao fogo (PF), obtido por análise termogravimétrica em ambiente oxidante (ar sintético) até 1000 °C, com taxa de aquecimento de 10 °C/min. Esse ajuste é necessário para considerar os teores de carbono, hidrogênio e oxigênio que não são diretamente determinados pela FRX. As pastilhas para a análise por FRX foram preparadas compactando cerca de 8g dos materiais com uma carga de 150 N mediante uma prensa mecânica (Figura 5).

Figura 5 - Equipamento S8 Tiger (a) Prensa para produção de pastilhas



Fonte: Maciel (2023)

3.2.3. Difractometria de Raios x (DRX)

A DRX é uma das principais técnicas de caracterização de estruturas em materiais cristalinos, seu princípio consiste na incidência de um feixe de raios X em uma amostra pulverizada, o que faz com que os elétrons nos átomos absorvam a radiação, causando oscilações que resultam na emissão de ondas em várias direções.

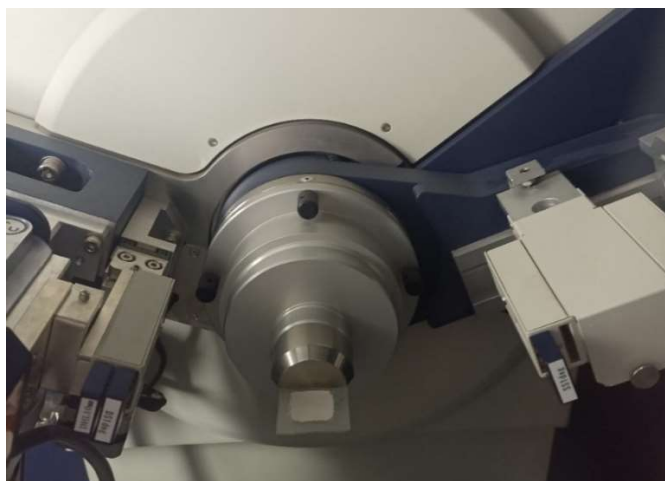
Esta técnica possui caráter tanto quantitativo quanto qualitativo. A análise dos picos no difratograma, quando comparada a bancos de dados específicos, permite avaliar o grau de cristalinidade ou amorfismo de uma amostra, além disso, fazer comparações qualitativas com outros materiais semelhantes. A abordagem qualitativa é especialmente útil para a caracterização de materiais minerais de construção civil, não apenas para sua identificação, mas

também para monitorar as transformações que ocorrem ao longo do tempo, incluindo o desenvolvimento de suas propriedades e os efeitos da deterioração (Lima, 2008).

A composição mineralógica das matérias-primas foi identificada pela difratometria de raios X (DRX), utilizando um equipamento modelo Rigaku (Figura 6), localizada na central dos laboratórios (LAB 114) da UFOB, com as seguintes configurações: radiação Cu K α ($\lambda = 0,154$ nm) a 21 °C com passo de 0,02° por segundo, na faixa de 5 a 65° (2 θ); o tubo de raios X será operado a 40 kV e 40 mA.

As fases cristalinas em cada difratograma serão interpretadas a partir de planilhas cristalográficas existentes no Inorganic Crystal Structure Database (ICSD) do software Highscore plus 3.0.5.

Figura 6 - Goniômetro do equipamento Rigaku para análise por difração de raios-X (DRX).

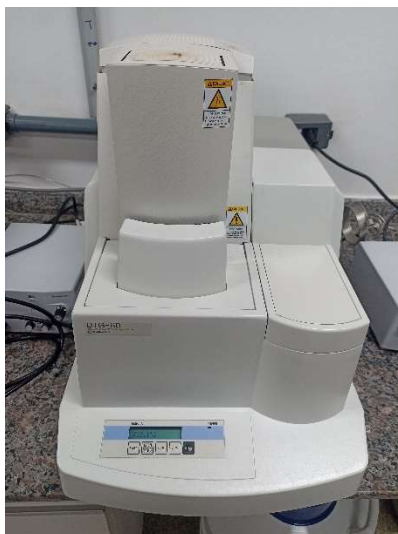


Fonte: Autora (2024)

3.2.4. Análise térmica (TG/DTA)

As análises de TG (Termogravimetria) e DTA (Análise Térmica Diferencial) das matérias-primas foram realizadas em um aparelho de análise simultânea DTG-60 da Shimadzu (Figura 7), na central dos laboratórios da UFOB, no laboratório 114. As avaliações foram realizadas na faixa de temperatura de 25 a 1000 °C, com taxa de aquecimento de 10 °C min⁻¹ sob fluxo de N₂ de 50 mL min⁻¹, utilizando-se aproximadamente 10 mg de amostra em um cadinho de platina. A perda ao fogo foi realizada na atmosfera de ar sintético.

Figura 7 - Equipamento para as análises térmicas



Fonte: Autora (2024)

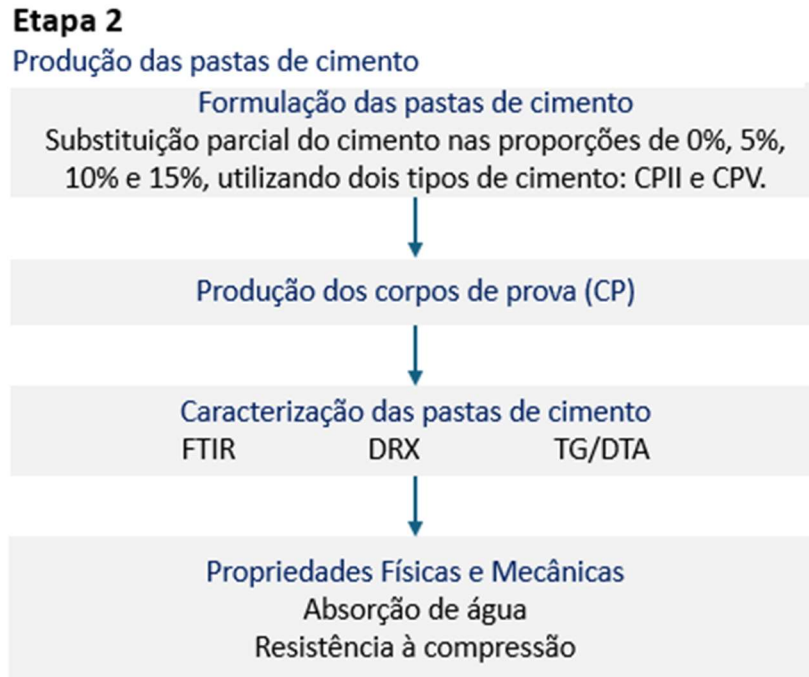
O TG pode medir a perda de massa em função do tempo e/ou da temperatura em condições atmosféricas controladas, com a utilização de uma termobalança sensível e precisa. As curvas resultantes fornecem dados sobre a composição, estabilidade térmica, e o comportamento da amostra, incluindo produtos intermediários e resíduos. Vários fatores, como a razão de aquecimento, atmosfera, e características da amostra, influenciam a precisão dos resultados. Além de fornecer informações sobre a hidratação, a TG é útil para estudar a perda de água, decomposição térmica de materiais orgânicos, corrosão de metais, reações no estado sólido, calcinação de minerais, e outros processos térmicos, ademais de proporcionar informações sobre volatilização e cinética de reações (Silva, Paola e Matos, 2007).

Enquanto a DTA pode fornecer informações sobre as transições de fase, medindo a diferença de temperatura entre uma amostra e um material de referência termicamente estável durante uma variação controlada de temperatura. Eventos endotérmicos ou exotérmicos são registrados como deflexões opostas na curva termodiferencial, permitindo a identificação de compostos com base na posição, forma e intensidade dos picos observados.

3.3 ETAPA 2 – PRODUÇÃO DE PASTAS DE CIMENTO COM SUBSTITUIÇÃO DO CIMENTO POR CINZAS DE CARVÃO DE CHURRASQUEIRA (CCC)

Segundo a Figura 8, é possível visualizar o diagrama de fluxo do programa experimental utilizado para a produção da pasta de cimento contendo CCC

Figura 8 - Fluxograma do programa experimental da produção da pasta de cimento

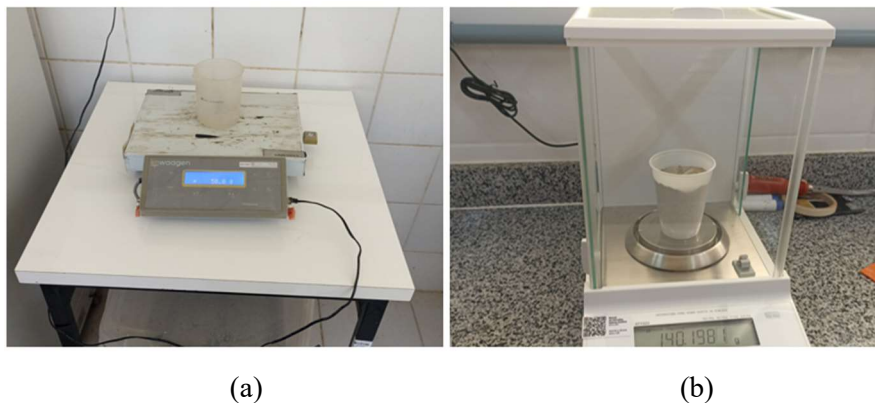


Fonte: Autora (2025)

3.3.1. Formulação

A produção das pastas de cimento envolveu o processo de pesagem das matérias-primas e a mistura manual dos componentes secos através de agitação em um pote de vidro por 60 segundos. Esse método utilizou como referência 100g de material anidro e o valor de água/sólidos de 0,50 (Figura 9). Esse valor foi escolhido com base em estudos De Brito (2020), Ribeiro et al. (2021) e Maciel (2023), que utilizam a mesma proporção na formulação de pastas cimentícias.

Figura 9 - Pesagem das matérias-primas (a) água (b) cimento



Fonte: Autora (2025)

Foram preparadas pastas com diferentes teores de cinza, substituindo os cimentos CII e CPV, variando entre 5, 10 e 15% do peso do cimento, além de duas pastas de referência. A primeira, denominada CII REF, consistiu exclusivamente de cimento Portland tipo II - F, e a segunda (CPV REF), que consistiu exclusivamente de cimento Portland tipo V – ARI. A composição das pastas é apresentada na Tabela 2.

Tabela 2 - Formulações das pastas de cimentos

Pastas de cimento	% em massa das matérias-primas		
	CII	CPV	CCC
CII REF	100	--	--
CPV REF	--	100	--
CII_5%	95	--	5
CII_10%	90	--	10
CII_15%	85	--	15
CPV_5%	--	95	5
CPV_10%	--	90	10
CPV_15%	--	85	15

Fonte: Autora (2024)

3.3.2. Produção das pastas de referência e conteúdo cinza de carvão de churrasqueira

O procedimento de mistura foi conduzido utilizando um misturador modelo 715 da marca FISATOM (Figura 10), seguindo os seguintes passos: a) a água foi adicionada inicialmente; b) o material anidro, previamente homogeneizado, foi então adicionado; c) a mistura ocorrerá por 1,5 minutos a 25000 rpm; d) após uma pausa de 1 minuto para realizar a mistura manual, visando soltar o material das paredes do recipiente e quebrar possíveis grânulos de material seco; e) finalmente, a mistura continua por mais 1,0 minutos a 1500 rpm.

As pastas foram moldadas em moldes cilíndricos com diâmetro de 1,84 cm e altura de 2,76 cm, conforme utilizado por Maciel (2023) (Figura 11 e Figura 12). Embora essas dimensões não estejam diretamente prescritas na norma NBR 5739: Concreto - Ensaio de compressão de corpos-de-prova cilíndricos (ABNT, 2018), a relação altura/diâmetro (h/d) de 1,50 está em conformidade com a recomendação da referida norma. Além disso, a adoção de moldes de menores dimensões se deu devido à maior facilidade de confecção e manipulação, especialmente em estudos laboratoriais com número elevado de amostras. Ressalta-se que, apesar das dimensões reduzidas os corpos de prova foram compactados de acordo com os procedimentos da norma anterior. Para isso, foram aplicadas colocadas 3 camadas de alturas aproximadamente iguais, recebendo cada camada 30 golpes uniformes com o soquete adaptado (cabo de um pincel). Os corpos de prova foram desmoldados 24 horas após a produção e, em

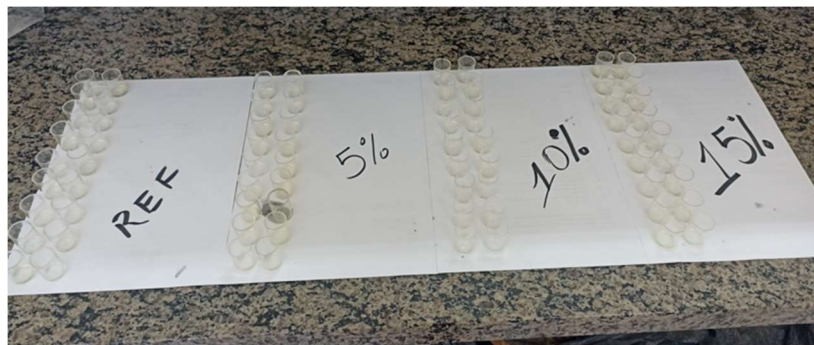
seguida, submetidos à cura submersa em água sem aditivos, em ambiente com temperatura ambiente, sendo curadas por períodos de 3, 7 e 28 dias.

Figura 10 - Misturador mecânico modelo 715 da marca FISATOM



Fonte: Autora (2024)

Figura 11 - Moldes dos corpos de prova com desmoldantes



Fonte: Autora (2025)

Figura 12 - Moldagem dos corpos de prova do CPlI



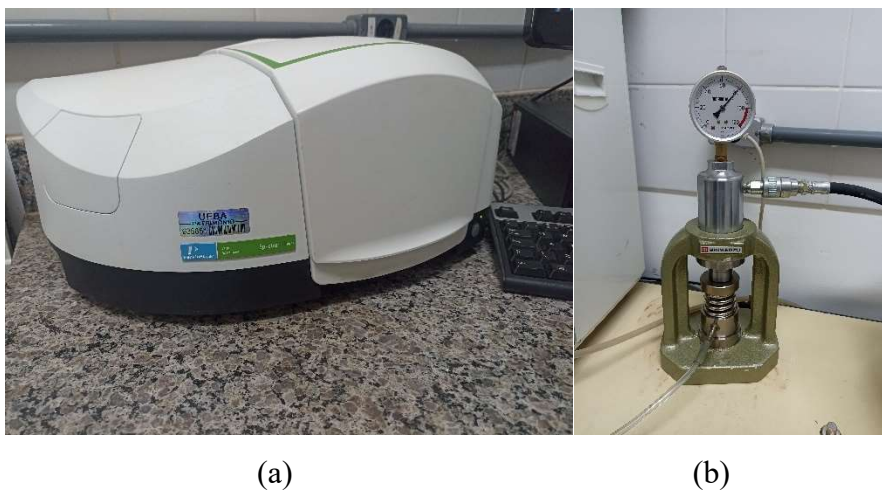
Fonte: Autora (2025)

3.3.3. Espectroscopia no Infravermelho com Transformada de Fourier (FTIR)

A Espectroscopia no Infravermelho com Transformada de Fourier (FTIR) foi realizada no espectrômetro Perkin Elmer Spectrum, localizado na central dos laboratórios (LAB 114) da Universidade Federal do Oeste da Bahia (UFOB) (Figura 13a). As amostras foram peneiradas através de uma peneira de abertura $75\mu\text{m}$ (200 mesh) e maceradas em almofariz de porcelana. Posteriormente, 40 mg de KBr e 0,40 mg das amostras serão misturados e presados em forma de pastilha utilizando uma prensa hidráulica, modelo da Shimadzu, do laboratório 114 (Figura 13b e Figura 14). Os espectros das amostras foram registrados na faixa de número de onda de 4000 a 400 cm^{-1} .

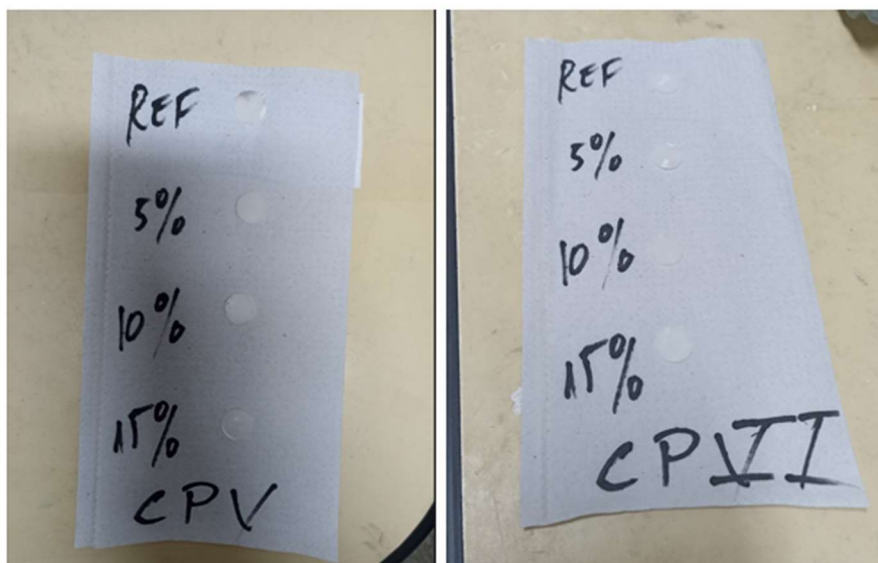
Ao medir a absorção de radiação infravermelha, utilizando o ensaio com FTIR, pode-se obter informações sobre as ligações químicas presentes na amostra medida, com a identificação de grupos funcionais e características estruturais das massas. Além disso, esse ensaio pode avaliar a atividade pozolânica dos materiais suplementares, o que auxilia no entendimento da resistência e durabilidade dos materiais.

Figura 13 - Espectrômetro da marca Perkin Elmer (a) e prensa hidráulica da marca Shimadzu (b).



Fonte: Autora (2024)

Figura 14 - Corpos de prova para o teste de FTIR após prensagem



Fonte: Autora (2025)

3.3.4. Difractometria de Raios X (DRX)

A identificação da composição mineralógica das pastas de cimentos foi realizada utilizando o método descrito no item 3.2.3.

3.3.5. Análise térmica (TG/DTA)

As análises de TG/DTA das pastas de cimento foram realizadas utilizando o método descrito no item 3.2.4.

3.3.6. Absorção de água por imersão (AA)

Os ensaios de absorção de água foram realizados com base nas especificações da NBR 9778: Argamassa e concreto endurecidos – Determinação da absorção de água, índices de vazios e massa específica (ABNT, 2005) na idade de 28 dias. Para isso, foram utilizados corpos de prova moldados exclusivamente para este ensaio, não havendo reaproveitamento de amostras previamente ensaiadas. As amostras foram secas em estufas a $105^{\circ}\text{C} \pm 5$ até atingirem massa constante (Figura 15) e pesadas para determinar a massa seca (m_s). Em seguida, as amostras foram imersas em água por 72 h. Após a saturação, foi removido o excesso de água superficial e a amostra inteira foi pesada para a determinação da massa úmida (m_{sat}). O valor de absorção de água (AA) em percentagem (%) foi obtido segundo a Equação 02.

$$AA = \frac{m_{\text{sat}} - m_s}{m_s} \times 100 \quad 01$$

Onde: AA = absorção de água (%); m_{sat} = massa do corpo de prova saturado em água (g); m_s = massa do corpo de prova seco (g).

Figura 15 - Secagem dos corpos de prova em estufa a $105^\circ\text{C} \pm 5$



Fonte: Autora (2025)

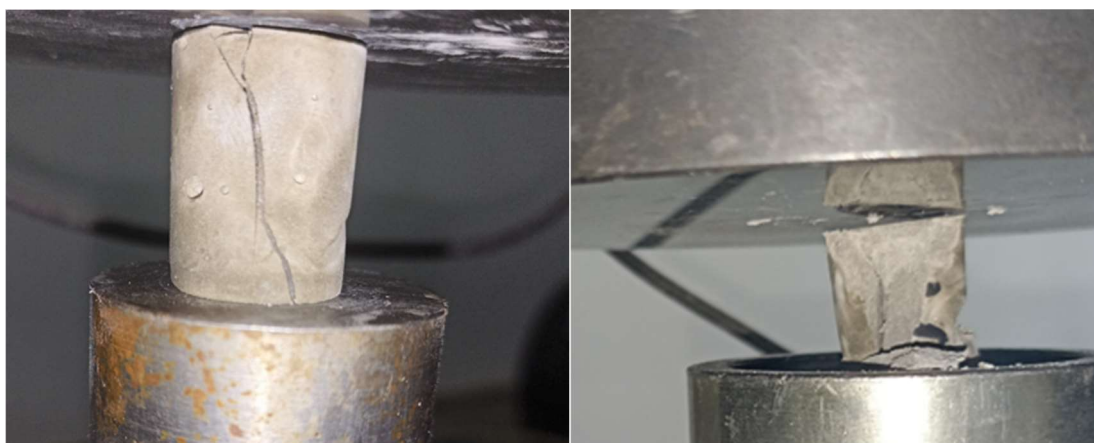
3.3.7. Resistência à Compressão Axial

O ensaio de resistência à compressão axial das pastas, tanto das referências quanto com adição de CCC, nas idades de 3,7 e 28 dias, foi realizado de acordo com as recomendações da NBR 5739 (ABNT, 2018), utilizando uma máquina de ensaios universal da marca EMIC, modelo DL 30000, com capacidade de carga de 300 kN e velocidade de carregamento de 0,05 MPa/s, localizada no Laboratório de Construção Civil da UFOB. Foram fabricados seis corpos de prova cilíndricos para cada formulação, com diâmetro de 1,84 cm e altura de 2,76 cm, os quais serão curados inicialmente por 24 horas em ambiente úmido, desmoldados e posteriormente curados em água até atingirem as idades dos testes (3, 7 e 28 dias). A resistência à compressão axial foi calculada utilizando a média das forças máximas obtidas nos ensaios, conforme a Equação 02:

$$F_c = \frac{F}{\pi r^2} \quad 02$$

Onde: F_c é a resistência à compressão axial em MPa; F a média das forças máximas obtidas por ensaio em N; e r o raio do corpo de prova em mm.

Figura 16 - Corpos de prova rompidos no ensaio de compressão axial (a) CPV e (b) CPII



(a)

(b)

Fonte: Autora (2025)

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Esse capítulo apresenta e analisa os resultados obtidos a partir dos ensaios de caracterização físico, mineralógica e química das matérias primas utilizadas, bem como o desempenho das pastas de cimento produzidas com substituições parciais do cimento Portland.

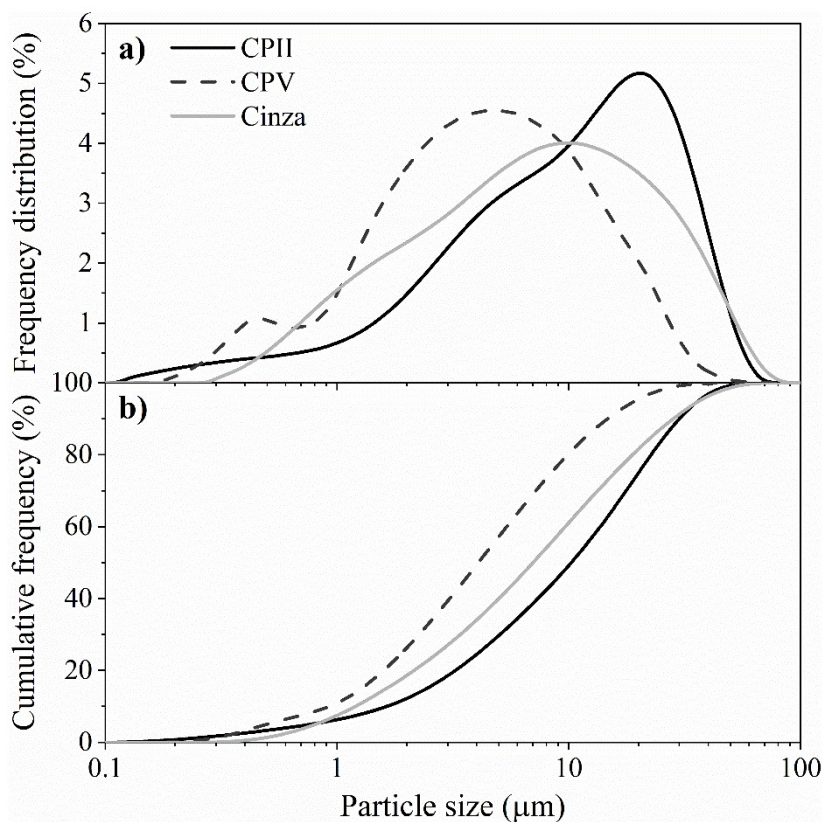
4.1 CARACTERIZAÇÃO DAS MATERIAIS-PRIMAS DE PARTIDAS

Esse subtópico aborda as características fundamentais das matérias primas, incluindo granulometria, composição química, mineralógica e análise térmica, importantes para entender o comportamento das matrizes cimentícias.

4.1.1. Distribuição de partículas das matérias primas

A Figura 17, apresenta três curvas distintas, cada uma representa a distribuição de partículas das matérias primas utilizadas nesse trabalho (CPV, CII e cinzas).

Figura 17 - Curvas de distribuição de partículas das matérias primas



Fonte: Autora (2025)

A curva de distribuição de frequência do CPV possui uma distribuição ligeiramente mais dispersa, cujo pico de frequência ocorre em uma faixa com cauda mais alongada, com

diâmetro entre aproximadamente 2 μ m e 10 μ m. Em comparação, a curva do CII apresenta uma distribuição mais estreita e com picos concentrados em faixas finas de partículas, com diâmetros entre aproximadamente 10 μ m e 30 μ m, indicando presença de partículas maiores, o que reflete a composição mista (com adições minerais) característica do cimento Portland II (NBR 16697, (ABNT 2018) e CIRINO, 2016). Como consta na NBR 16697 (ABNT, 2018), os resíduos na peneira 75 μ m devem ser menores ou iguais a 12% para o cimento CII F, o que se confirma no resultado da figura 11, já que D88% da finura do cimento é menor que 55 μ m.

A curva acumulativa do CII tem uma inclinação acentuada, com transição rápida da base para o topo, com D50% próximo a 15-20 μ m, assim como D90% entre 35-40 μ m, refletindo alta uniformidade. Ademais, a curva acumulativa do CPV tem uma inclinação um pouco menos acentuada, com D50% aproximadamente entre 20-30 μ m.

A curva de distribuição da amostra de cinzas de carvão de churrasqueira exibe uma distribuição de frequência mais ampla, sem um pico tão acentuado e com presença significativa de partículas maiores que 40 μ m. Além disso, sua curva acumulada, menos inclinada e com subida mais gradual, expressa valores de D10%, D50% e D90% mais altos, confirmando a presença de partículas maiores e ampla distribuição (De Santana et. al., 2011). Porém, segundo Torres (2019), as cinzas ainda apresentam granulometria fina. O que é importante a ser considerado, porque material fino preenche os vazios, apresentando o efeito secundário de filler (Rodrigues e Beraldo, 2010).

4.1.2. Composição Química

Os resultados das análises de composição química das matérias-primas cimento Portland tipo V de alta resistência inicial (CPV), cimento Portland tipo II (CII) e a cinza de churrasqueira encontra-se na Tabela 3.

De acordo com a Tabela 3 o CPV e o CII têm suas composições semelhantes e são fundamentalmente compostos de óxidos de cálcio e silício, com percentuais minoritários de óxido de alumina, ferro e magnésio, correspondendo porcentagem típica dos componentes químicos do cimento Portland apresentada por Castro (2021).

Tabela 3 - Resultados dos ensaios de FRX

Oxido	CPV	CPII	CINZA
CaO	54,01	56,08	77,22
SiO ₂	22,45	22,80	1,62
Al ₂ O ₃	9,81	7,04	0,45
SO ₃	4,97	4,59	1,98
MgO	3,55	3,54	3,05
Fe ₂ O ₃	2,52	2,91	0,23
K ₂ O	1,07	1,48	7,19
TiO ₂	0,65	0,48	0,07
Na ₂ O	0,42	0,59	3,47
SrO	0,22	0,20	0,19
P ₂ O ₅	0,11	0,11	1,60
MnO	0,07	0,05	0,21
V ₂ O ₅	0,03	-	-
ZnO	0,03	0,03	0,03
BaO	0,03	0,02	-
ZrO ₂	0,02	0,03	0,02
Cl	0,02	0,02	2,64
Cr ₂ O ₃	0,01	0,01	-
NiO	0,01	0,01	0,01
Outros	0,01	0,01	0,03
Total	100,00	100,00	100,00

Fonte: Autora (2025)

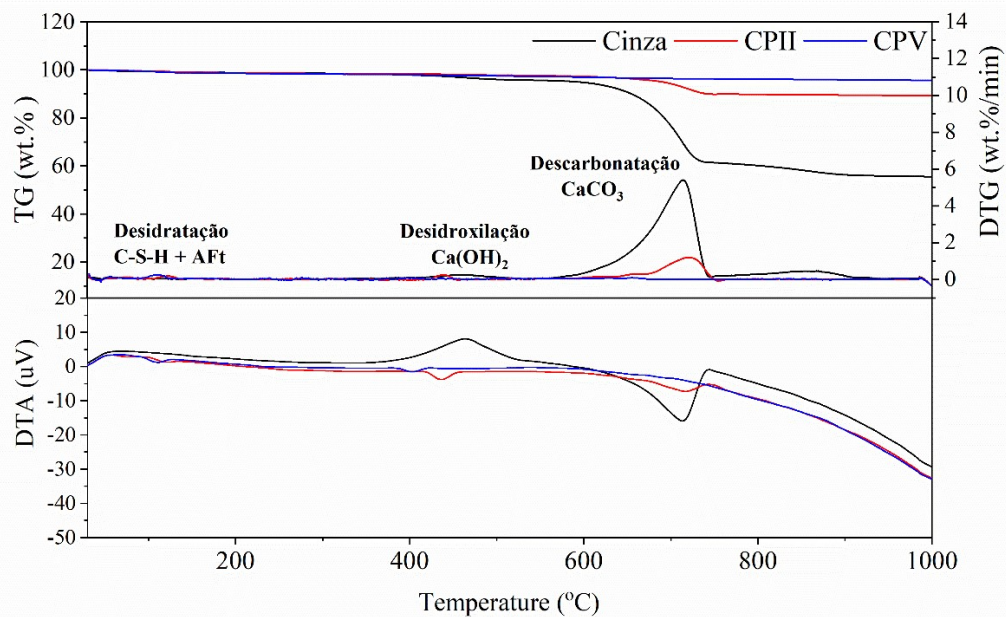
A cinza por sua vez apresentar a majoração em óxidos de cálcio (77,22%), e teores menores que 2% de óxidos de silícios e alumínio, o que difere da composição dos cimentos apresentada acima. Além disso, as cinzas detêm teores significativos de álcalis: K₂O (7,19%), Na₂O (3,47%) e Cl (2,64%), os quais são oriundos das matérias orgânicas que entraram em contato com as cinzas, como carnes e sais (USDA, 2020). Além disso, álcalis estão associados a reação álcali-agregado (RAA) em concretos, que quando apresentam elevado teor, podem reagir com outros minerais e causar a desintegração do material, conforme a NBR 15577-1 Agregados - Reatividade álcali-agregado - Parte 1: Guia para avaliação da reatividade potencial e medidas preventivas para uso de agregados em concreto (ABNT,2018), Toledo, 2016 e Felício, 2018.

4.1.3. Análise Térmica (TG/DTG e DTA)

A Figura 18 apresenta as análises termogravimétricas (TG), análises termogravimétricas derivadas (DTG) e análises térmicas diferenciais (DTA) dos cimentos CPII F e CPV ARI, e das

cinzas de carvão de churrasqueira. Todas as curvas apresentadas nas análises de TG/DTG e DTA evidenciam eventos térmicos bem definidos, ambas matérias primas apresentam perda de água superficial na faixa inicial. Os cimentos CPV e CPII exibem, na curva DTA, picos endotérmicos entre 100-150 °C devido à evaporação da água superficial adsorvida (Lima, 2023).

Figura 18 - Curvas de análise termogravimétrica, análise termogravimétrica derivada e análise térmica diferencial do CPII, CPV e das cinzas de carvão de churrasqueira.



Fonte: Autora (2025)

Nas curvas TG/DTG, observam-se picos entre 400 e 550 °C, atribuídos à presença de desidroxilação de hidróxidos de cálcio (portlandita), cuja formação decorre do processo de hidratação espontânea após o contato com a umidade do meio ambiente (Maciel, 2023), sendo o CPV mais expressivo devido ao seu maior teor de clínquer puro em comparação ao CII.

Em faixas superiores, aproximadamente entre 600 e 800 °C, todos os materiais analisados apresentaram picos endotérmicos nas curvas DTA e perdas de massa nas curvas TG/DTG, associados à decomposição de carbonatos, em consonância com o comportamento descrito por Oliveira et al. (2020), que destacam que a perda de massa entre 500-800 °C está relacionada principalmente a decomposição térmica de carbonatos como o $CaCO_3$, com liberação de CO_2 .

Especificamente, o CPV apresentou uma perda de massa total de 6,01%, associada principalmente a perda de água pela desidroxilação da portlandita na faixa entre 400 e 550 °C, indicado pelo pico negativo na curva DTG. Já as curvas TG/DTG do CII mostra uma perda

Na cinza do carvão de churrasqueira observou-se a presença das fases quartzo (SiO_2), caulinita ($\text{Al}_4(\text{OH})_8(\text{Si}_4\text{O}_{10})$), Anidrita (CaSO_4), hidrato de sulfato de cálcio e potássio ($\text{K}_2\text{Ca}_5(\text{SO}_4)_6(\text{H}_2\text{O})$), como fases predominantes e ainda a presença da muscovita ($\text{KAl}_2\text{Si}_3\text{AlO}_{10}(\text{OH})_2$) e calcita (CaCO_3), conforme Figura 13. A anidrita provavelmente foi formada pela interação do cálcio organicamente associado nos constituintes orgânicos microscópicos do carvão ou dos poros da água, com o SO_2 proveniente da presença de enxofre orgânico na decomposição dos minerais em rochas inorgânicas (Pinetown *et al* (2007)).

4.2 PRODUÇÃO DE PASTAS DE CIMENTO COM SUBSTITUIÇÃO DO CIMENTO POR CINZA

Esse subtópico discorre os resultados dos ensaios realizados nas pastas endurecidas, avaliando as propriedades relacionadas a espectroscopia no infravermelho, à formação de fases hidratadas, análise térmica (TG/DTA), porosidade aparente, absorção de água por imersão e resistência mecânica, de forma a entender o impacto da adição de cinzas de carvão de churrasqueira no desempenho final dos compósitos.

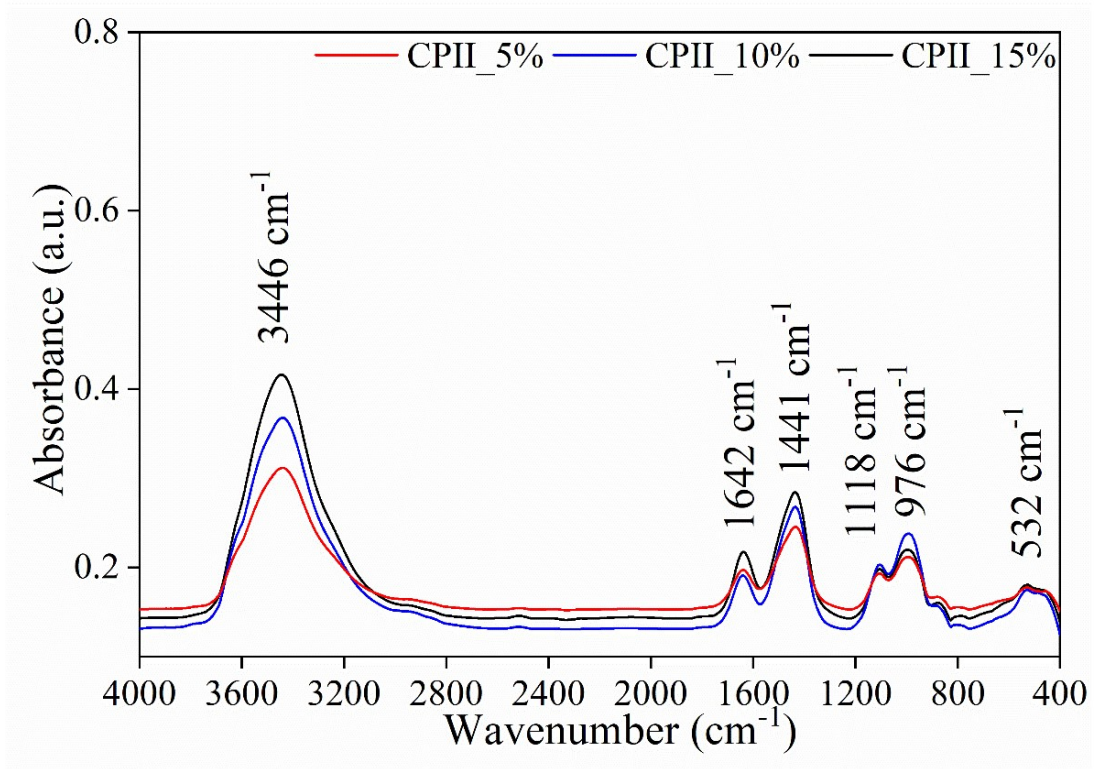
4.2.1. Espectroscopia no Infravermelho com Transformada de Fourier (FTIR)

As principais frequências responsáveis pelo espectro de absorção das pastas de cimentos são as ligações do hidrogênio dos grupos estruturais OH, as vibrações Si-O e Al-O nas subcamadas tetraédricas e octaédricas e outros óxidos minerais associados. Os espectros de FTIR das pastas de cimento com CCC estão apresentadas nas Figuras 20 e 21.

O espectro FTIR das amostras CPII_5, CPII_10, CPII_15 (Figura 20) e das amostras CPV_5, CPV_10, CPV_15 (Figura 21), mostra as alterações estruturais na matriz cimentícia com a incorporação das cinzas oriundas da queima do carvão de churrasqueira. Observa-se que as amostras apresentam bandas de absorção similares entre os intervalos de 4000 cm^{-1} e 1400 cm^{-1} , comportamento relatado por Carvalho *et al.* (2022), que atribuiu essas características à modificando sua estrutura a partir dessa faixa, demonstrando a formação de óxidos.

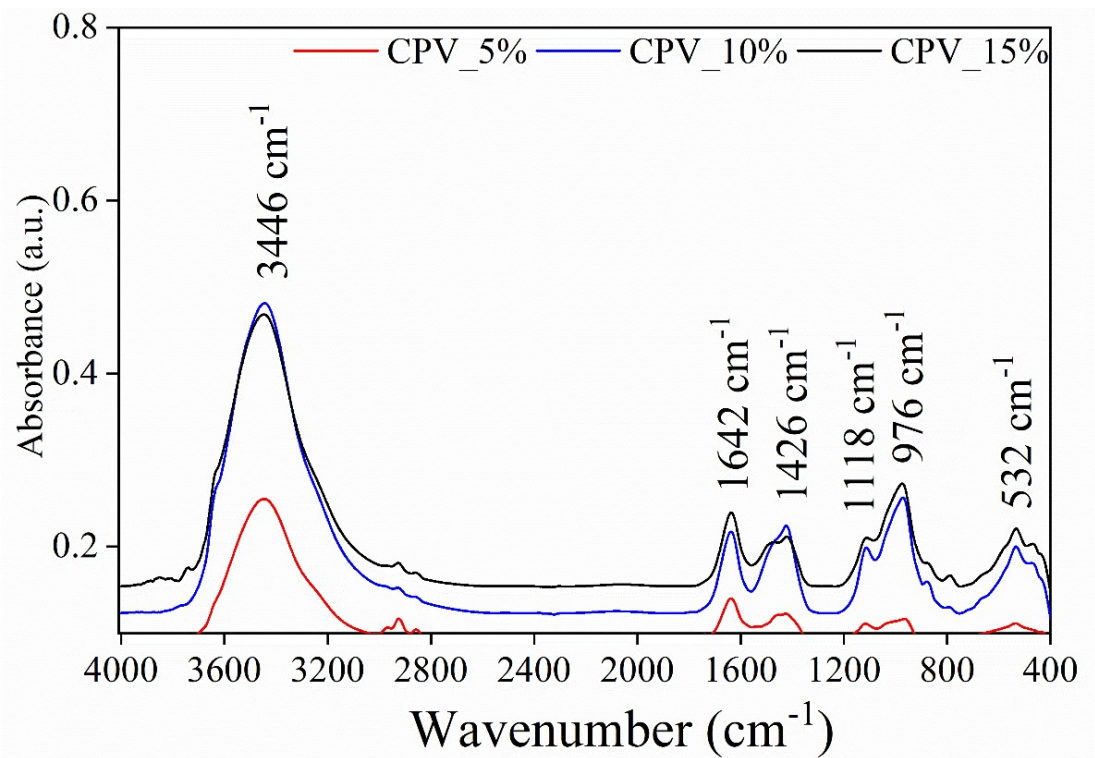
De acordo com Jose *et al.* (2020), as bandas localizadas entre 3000 e 3750 cm^{-1} são atribuídas ao estiramento dos grupos O-H. Já a banda próxima a 1650 cm^{-1} está relacionada a vibração de deformação da molécula de água (H-O-H), associada a absorção ou a ligação de água presente entre camadas (SHAN *et al.*, 2012).

Figura 20 - Espectros de FTIR para as amostras CPII5, CPII10 e CPII15.



Fonte: Autora (2025)

Figura 21 - Espectros de FTIR para as amostras CPV5, CPV10 e CPV15



Fonte: Autora (2025)

As bandas nos comprimentos de 1450 a 1480 cm^{-1} estão relacionadas à presença do íon carbonato (CO_3^{2-}) em função de reações de carbonatação ou da própria natureza calcária das cinzas (Zhen et al., 2013; Jose et al., 2020). Uma banda larga centrada em 976 cm^{-1} , que está associada à tensão assimétrica das ligações Si-O dos grupos SiO_4 da alita (C_3S) e da belita beta ($\beta-C_2S$) (DENG et al., 2002; TORRES-CARRASCO et al., 2017 apud MACIEL, 2023), assim como a região entre 400-800 cm^{-1} está associada às vibrações de estiramento da ligação Si-O (MARTIN et al., 2007).

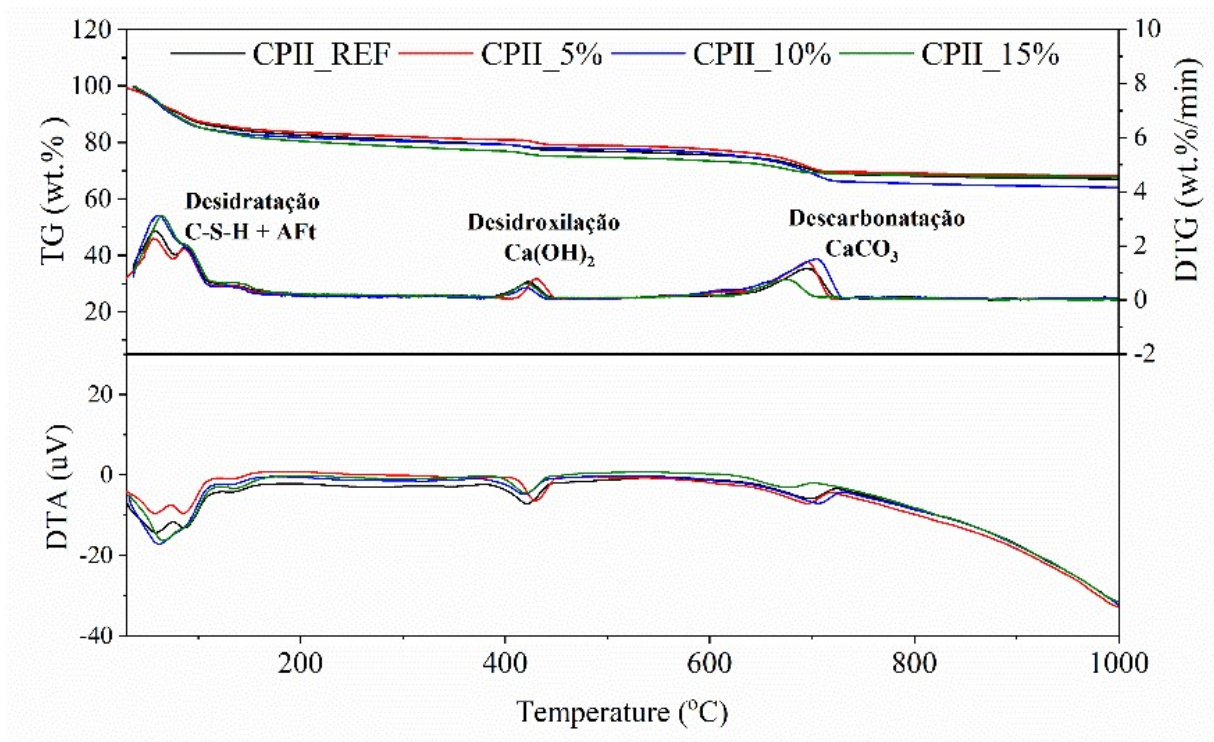
Observa-se ainda que, em ambas as séries analisadas (CPII e CPV), a intensidade das bandas aumenta proporcionalmente ao teor de cinza adicionado, o que pode ser atribuído ao processo de recristalização devido à temperatura (SANTOS, 1992 apud Maciel, 2023).

4.2.2. Análise térmica (TG/DTG e DTA)

Nas análises térmicas das pastas compostas por cimento CPII (Figura 22) e CPV (Figura 23), observa-se que os principais eventos térmicos ocorrem em faixas de temperatura semelhantes. Em ambas as figuras, é possível identificar as etapas típicas da decomposição dos produtos de hidratação do cimento Portland: desidratação (até ~ 200 °C), desidroxilação da portlandita (~ 350 – 450 °C) e decomposição de carbonatos (~ 600 – 800 °C).

A Figura 22 apresenta os resultados das análises térmicas para as amostras CPII_REF, CPII_5, CPII_10 e CPII_15 aos 28 dias de cura. Nas faixas iniciais, todas as amostras apresentam perda de massa relacionada à evaporação da água livre e à desidratação de produtos como C-S-H e etringita. Observa-se que a perda de massa é ligeiramente maior nas formulações com maiores teores de cinza (CPII_10 e CPII_15). Na faixa de 350–450 °C, correspondente à desidroxilação da portlandita ($Ca(OH)_2$), a amostra de referência (CPII_REF) apresenta o maior pico de perda de massa, além do pico endotérmico mais acentuado. Já entre 600 e 800 °C, as curvas mostram eventos relacionados à decomposição de carbonatos ($CaCO_3$), sendo o pico mais definido observado para a amostra CPII_10.

Figura 22 - Curvas de análise termogravimétrica, análise termogravimétrica derivada e análise térmica diferencial para os materiais de CPII REF, CPII5, CPII10 e CPII15 após 28 dias.

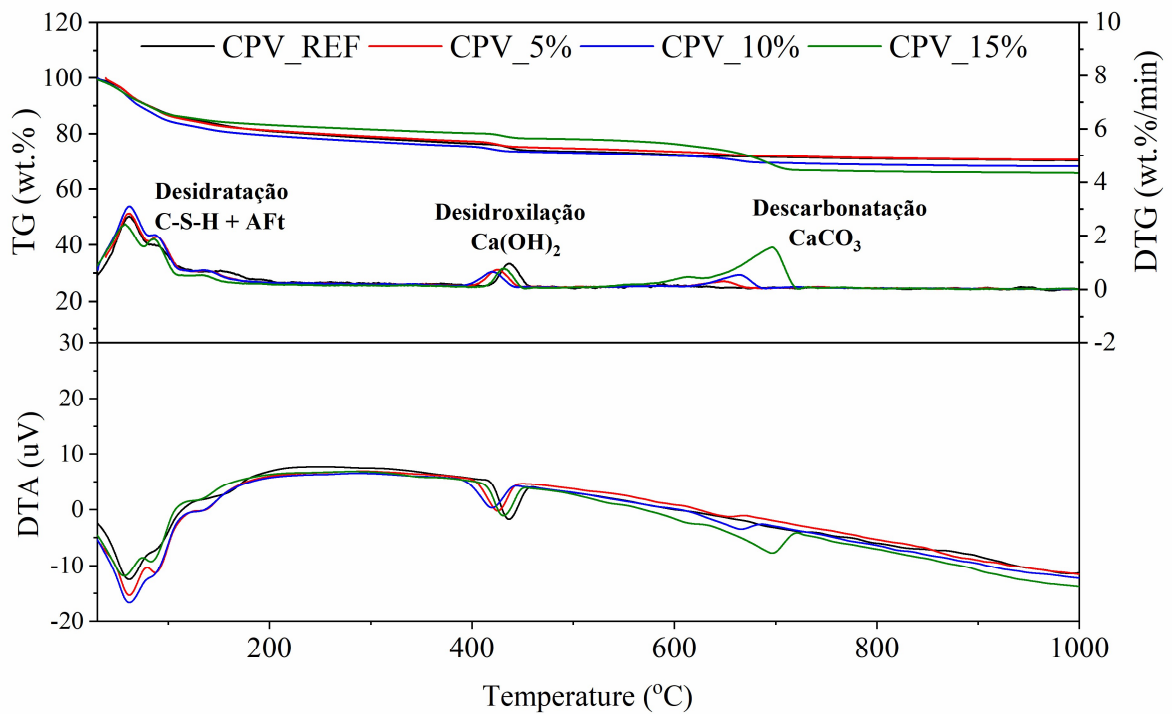


Fonte: Autora (2025)

A Figura 23, referente às amostras com cimento CPV, mostra que nas faixas de desidratação, as amostras CPV_REF e CPV10 apresentam os picos mais acentuados, assim como picos mais longos na faixa de desidroxilação da portlandita. Por fim, na faixa de decomposição de carbonatos, o CPV15 se destaca por apresentar um pico significativamente maior que os demais, indicando possível acúmulo de carbonatos oriundos da cinza ou da carbonatação secundária da matriz.

Em termos de perda de massa total, a amostra CII10 apresentou valores ligeiramente superiores às demais da Figura 22. Por outro lado, nas amostras com CPV (Figura 23), a perda de massa total tende a diminuir gradativamente conforme aumenta o teor de cinza.

Figura 23 - Curvas de análise termogravimétrica, análise termogravimétrica derivada e análise térmica diferencial para os materiais de CPV REF, CPV5, CPV10 e CPV15 após 28 dias.



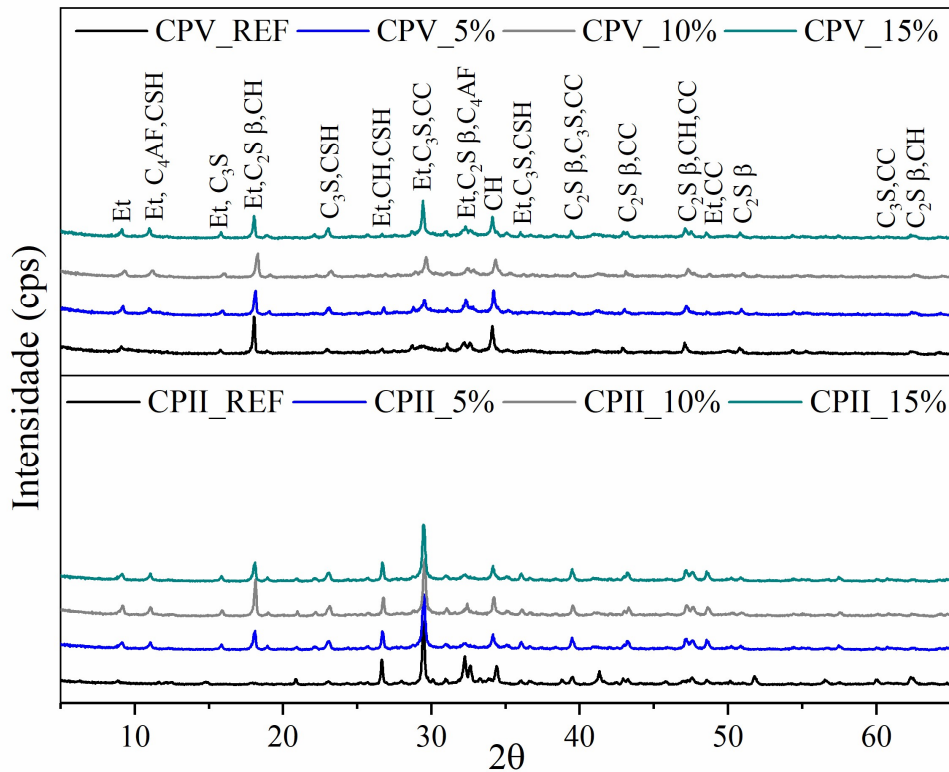
Fonte: Autora (2025)

4.2.3. Difratometria de raios X (DRX) das pastas de cimento

Os dados de difratometria das pastas de cimento da referência CPV_REF e CPII_REF e com CPV_5%, CPV_10% e CPV_15%, e CII_5%, CII_10% e CII_15% com cinza de carvão com idade de 28 dias são apresentadas na Figura 24.

Nos difratogramas de raio-X, na Figura 24, foram identificadas as fases de cimento hidratado e anidro essencialmente composta pelas fases: portlandita (CH), etringita (Et), belita, Jenita (CSH), calcita (CC), beta (C₂S β), alita (C₃S), ferrita (C₄AF).

Figura 24 - - Difractograma de raios-X das pastas de cimento contendo CCC aos 28 dias (Et: Etringita; CH: Portlandita; CC; Calcita; C₂S β: Belita b; C₃S β: Alita; C₄AF: Ferrita; CSH Jenita.



Fonte: Autora (2025)

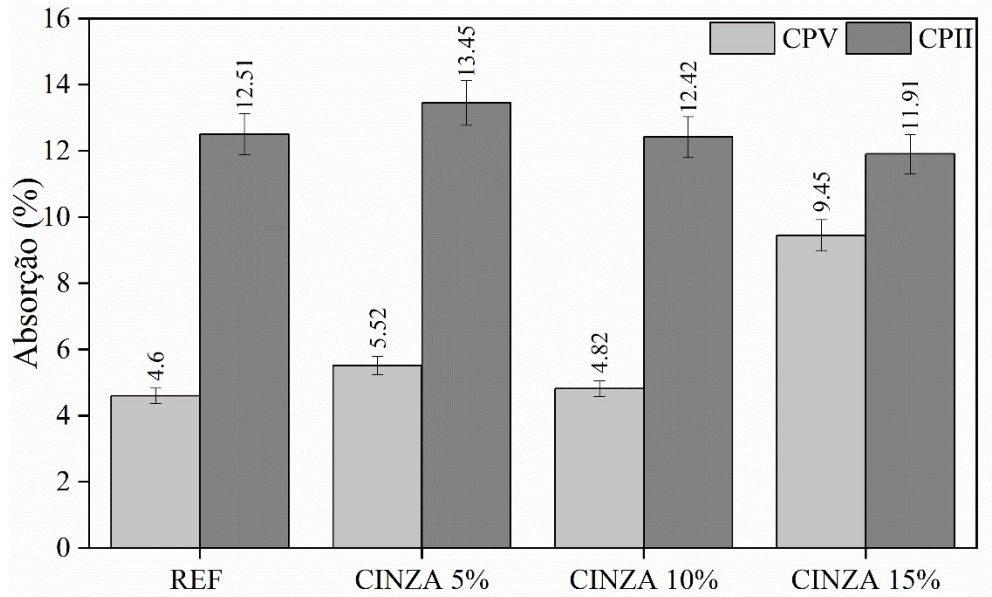
Podemos perceber na Figura 24 que ocorreram alterações muito leves nas intensidades dos picos da fase da etringita (Et), nas fases anidras C₃S e C₂S, assim como da fase C₄AF. Indicando assim, a presença de grãos anidros residuais nas pastas das fases anidras (MEHTA; MONTEIRO, 2008).

A intensidade dos picos da fase portlandita (CH) a exemplo em 18,21°, 28,92° e 34,31° (2θ) nas pastas com cinza de carvão (CCC) deve-se à soma dos efeitos da diminuição da quantidade cimento e ao efeito fíler da CCC. Por essa razão, a pasta CPV e CPII com cinza tiveram maiores intensidade do pico do CH.

4.2.4. Absorção de água por imersão (AA)

A Absorção de água para as pastas de cimento CPV e CPII com substituição de cinza de carvão em 5, 10 e 15% são mostradas na Figura 25.

Figura 25 - Absorção de água das pastas de cimento, CPV e CPII com substituição de cinza de carvão aos 28 dias.



Fonte: Autora (2025)

Nas pastas de cimentos com cimento CPV, observou-se que a amostra de referência apresentou o menor valor de absorção de água, o que é compatível com as características do CPV, um cimento com mais pureza e ao mesmo tempo foi compatível com o encontrado na análise da porosidade aparente. Com a adição de 5% e 10% de cinzas de carvão, ocorreu o um aumento discreto na absorção. Porém, a substituição de 15% apresentou o maior valor de absorção entre as amostras com CPV, afirmando a deficiente ação pozolânica, como indica Mossmann (2023).

Para as pastas com cimento CPII, a tendência foi oposta. A amostra de referência apresentou um valor inicial maior do que o CPV, coerente com a presença de adições minerais no próprio cimento. Com 5% de incorporação de cinzas, houve um aumento na absorção de água. Esse comportamento se opõe com 10% de substituição, cujos valores foram próximos aos da referência. E com a substituição de 15%, que por sua vez, resultou na menor absorção de água. Segundo Martins (2022), a redução presente na incorporação com 10 e 15% de cinzas podem estar relacionadas ao empacotamento das partículas do resíduo, ocupando espaços diferentes de acordo com sua adição nas pastas, e assim acontecendo o efeito filer.

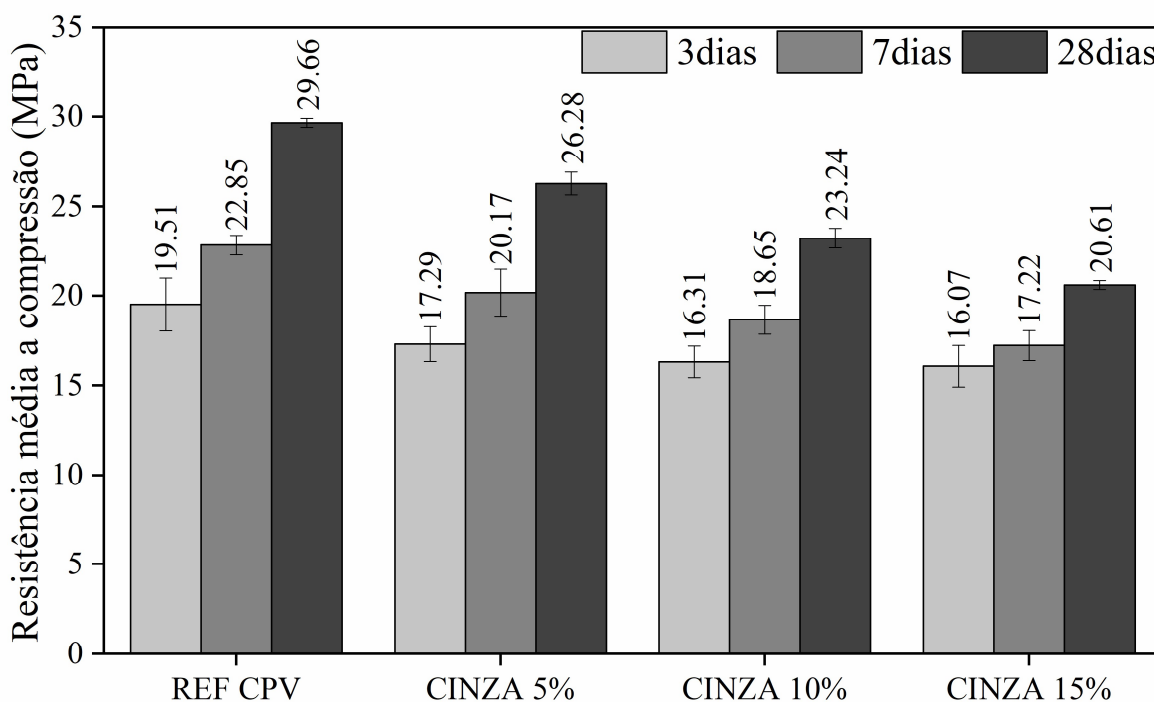
4.2.5. Resistência à Compressão Axial

A Figura 26 apresenta os valores de resistência à compressão após hidratação por 3, 7 e 28 dias para pastas produzidas com cimento CPV e diferentes teores de substituição por CCC (0%, 5%, 10% e 15%). Observa-se que, ao longo das idades, houve uma queda gradual de resistência para todos os teores de substituição. Além disso, em todas as idades avaliadas, a

amostra de referência (REF CPV) obteve os maiores valores de resistência, em média com 19,51 MPa aos 3 dias, 22,85 MPa aos 7 dias e 29,66 MPa aos 28 dias, confirmando o melhor desempenho mecânico do cimento sem substituição.

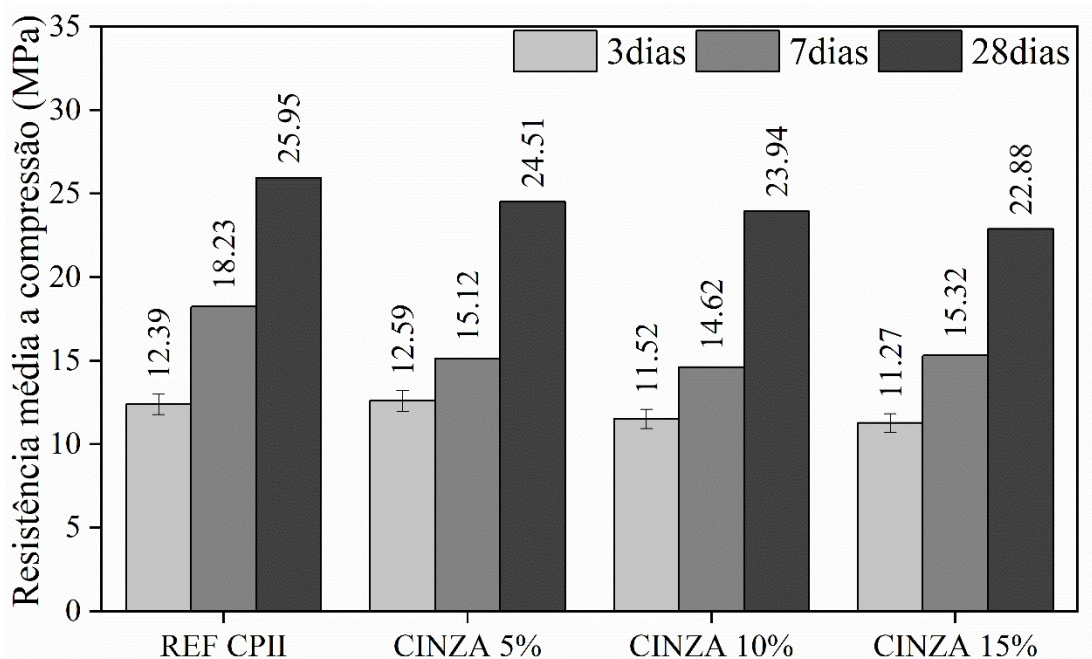
As amostras com substituição de 5% apresentaram valores moderadamente menores à referência, com variações percentuais entre 11 e 12%. A substituição de 10% de cinzas teve reduções mais expressivas, com perdas médias de 16,39% aos 3 dias, 18,39% aos 7 dias e 21,68% aos 28 dias. A substituição de 15% de cinza foi a que mais comprometeu a resistência à compressão, com perdas médias de 17,64% aos 3 dias, 24,66% aos 7 dias e 30,50% aos 28 dias (Figura 20).

Figura 26 - Resistência à compressão das pastas de cimento com cimento CPV (REF CPV) e com substituição de cinza de carvão em 5, 10 e 15% aos 3, 7 e 28 dias.



Fonte: Autora (2025)

Figura 27 - Resistência à compressão das pastas de cimento com cimento CII (REF CII) e com substituição de cinza de carvão em 5, 10 e 15% aos 3, 7 e 28 dias.



Fonte: Autora (2025)

Na Figura 27, os resultados de resistência à compressão para as pastas de referência produzidas com cimento CII e diferentes teores de substituição por CCC, avaliadas nas idades de 3, 7 e 28 dias, apresentou os maiores valores de resistência aos 7 e 28 dias. No entanto, aos 3 dias, a substituição com 5% de cinzas resultou em uma resistência igual a de referência levando em consideração o desvio padrão.

Aos 28 dias, observou-se uma redução gradual da resistência à medida que se aumentou o teor de substituição por CCC. A maior queda foi registrada para a substituição de aproximadamente 15%, com uma variação percentual média de 11,83% em relação à amostra de referência. Esse resultado indica que, mesmo nos maiores teores, as perdas de desempenho mecânico foram relativamente moderadas, especialmente se comparadas às perdas observadas para o cimento CPV, nas quais as reduções chegaram a aproximadamente 30,50% aos 28 dias. Para os valores com 3 e 7 dias, ocorreu uma diminuição significativo na resistência com 10% de substituição, sendo aproximadamente 7,02% e 19,79%, respectivamente (Figura 26).

De acordo com Reis et al. (2020), como os valores de resistência a compressão estão acima de 20 MPa para todas as composições, tal produto pode ser incorporado em placas de concreto, blocos de pavimentação, lajes e demais elementos que não exijam resistências tão elevadas.

Segundo Martins (2022), vários estudos relatam uma suave redução da resistência à compressão com o aumento do nível de substituição de cimento por cinzas, além disso, ele afirma que esse comportamento está associado à distribuição do tamanho de partícula de cinza que se aproximam do tamanho das partículas apresentadas pelo cimento, mas que não apresentam carácter pozolânico. Dessa forma, as cinzas auxiliam na compactação da matriz cimentícia, participando do efeito filer.

5. CONCLUSÃO

A pesquisa proposta neste trabalho foi concebida com o objetivo de desenvolver materiais alternativos a partir da incorporação de cinzas oriundas da queima do carvão de churrasqueira (CCC) em matrizes cimentícias. As conclusões aqui apresentadas baseiam-se nos resultados obtidos por meio da caracterização das matérias-primas e da avaliação do desempenho físico-químico e mecânico das pastas de cimento formuladas com adições de CCC em diferentes teores (5%, 10% e 15%).

A análise granulométrica demonstrou que os cimentos utilizados (CPII e CPV) apresentaram distribuição de partículas inferior a 75 μm , conforme indicado pela NBR 16697 (ABNT, 2018). Já as cinzas apresentaram granulometria ligeiramente superior à dos cimentos, mas ainda dentro da faixa de materiais finos (<100 μm), conforme literatura técnica, o que caracteriza a atuação do resíduo como um material de preenchimento (efeito filler).

A composição química, obtida via Fluorescência de Raios X (FRX), indicou altos teores de álcalis — K_2O (7,19%), Na_2O (3,47%) e Cl (2,64%) — e baixos teores de SiO_2 . Esses resultados revelam um potencial limitado de pozolanicidade das cinzas, e sugerem que seu comportamento no compósito cimentício é predominantemente físico, sem contribuição significativa por reatividade química. Além disso, a presença elevada de álcalis pode representar risco de reações deletérias, como a reação álcali-agregado, caso as cinzas fossem aplicadas em concreto convencional.

As análises térmicas (TG/DTA) das matérias-primas revelaram que as cinzas apresentam maior perda de massa total (~40%), especialmente na faixa de decarbonatação (600–800 $^\circ\text{C}$), sugerindo que a queima do carvão não ocorreu de forma completa. Ainda assim, o comportamento térmico geral foi semelhante ao dos cimentos, indicando estabilidade térmica compatível com o uso em compósitos cimentícios.

Os ensaios de FTIR das pastas evidenciaram bandas associadas ao estiramento de grupos O–H e às vibrações da ligação Si–O, características de fases hidratadas como C–S–H. Isso indica que a hidratação da matriz ocorreu normalmente, e que a presença da CCC não impediu o desenvolvimento dos produtos de hidratação. No entanto, as cinzas não promoveram formação de novos compostos típicos de pozolanas ativas.

Nas análises térmicas das pastas, foi possível observar o comportamento típico da decomposição dos produtos hidratados. A amostra CPII10 apresentou a maior perda de massa entre as pastas com cimento CPII, enquanto, nas pastas com CPV, observou-se uma redução progressiva da massa com o aumento do teor de cinzas.

Os ensaios de absorção de água por imersão e porosidade aparente indicaram valores ligeiramente menores nas pastas com CPII em consequência da adição de cinzas, reforçando o papel das cinzas como material de preenchimento.

Quanto à resistência à compressão axial, observou-se uma redução gradual com o aumento do teor de cinzas. As pastas com 5% e 10% de CCC mantiveram valores aceitáveis para aplicações em elementos que não exijam resistência tão elevada, enquanto o teor de 15% indicou uma redução mais acentuada. Esses resultados corroboram a hipótese de atuação como filer e demonstram que o desempenho mecânico ainda é satisfatório até o limite de 10% de substituição.

Portanto, com base nas conclusões acima, a incorporação das cinzas de carvão de churrasqueira é viável até o limite de 10%, atuando como material de preenchimento, sem gerar reatividade pozolânica significativa. Ainda que seu desempenho técnico seja limitado em relação à atividade cimentícia, seu uso é justificado pela contribuição à sustentabilidade na construção civil, ao permitir a valorização de um resíduo sólido urbano que, de outra forma, seria descartado de forma inadequada.

5.1 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Para trabalhos futuros com a utilização de cinzas oriundas da queima de carvão de churrasqueira sugerimos a realização dos seguintes estudos:

- Verificação das propriedades físicas e mecânicas de materiais cimentícios (argamassa e concreto) com cinzas de carvão de churrasqueira (CCC).
- Análise do ciclo de vida (ACV) e a reação álcalis-agregado (RAA) da utilização da CCC em novos materiais na Construção Civil.
- Comparação das propriedades físicas, mecânicas, químicas e mineralógicas das CCC calcinadas e in natura.

REFERÊNCIAS

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

_____. NBR 9778: Argamassa e concreto endurecidos – Determinação da absorção de água, índices de vazios e massa específica. Rio de Janeiro, 2009.

_____. NBR 10004 – Resíduos sólidos – Classificação. Rio de Janeiro, 2004.

_____. NBR 12653: Materiais pozolânicos - Requisitos. Rio de Janeiro: ABNT, 2014.

_____. NBR 10520: Informação e documentação: citações em documentos. Rio de Janeiro, 2023.

_____. NBR 15577-1: Agregados - Reatividade álcali-agregado - Parte 1: Guia para avaliação da reatividade potencial e medidas preventivas para uso de agregados em concreto. Rio de Janeiro, 2018.

_____. NBR 16697 – Cimento Portland – Requisitos. Rio de Janeiro, 2018.

ABRÃO, P. C. R. A. **O uso de materiais cimentícios suplementares: Disponibilidade, reatividade, demanda de água e indicadores ambientais.** Dissertação (Mestrado) – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, Departamento de Engenharia Civil, São Paulo, 2019.

ABREMA - Associação Brasileira de Empresas de Limpeza Pública e Resíduos Especiais. Panorama. Disponível em: <https://www.abrema.org.br/panorama/>. Acesso em: 30 mai. 2024.

_____. Panorama dos Resíduos sólidos no Brasil 2023. Disponível em: <https://www.abrema.org.br/>. Acesso em: 30 mai. 2024.

ALMEIDA, B. M. **Estudo das propriedades mecânicas e microestruturais de materiais cimentícios geopoliméricos produzidos a partir de metacaulim e escória de alto forno.** 2023. 132 f. Dissertação (Mestrado em Ciência e Engenharia de Materiais) - Campus Universitário de Ananindeua, Universidade Federal do Pará, Ananindeua, 2023. Disponível em: <https://repositorio.ufpa.br/jspui/handle/2011/15799>. Acesso em: 20 jun. 2024.

ANDRADE, Daniel da Silva. **Microestrutura de pastas de cimento Portland com nanossílica coloidal e adições minerais altamente reativas.** 2017. Tese (Doutorado em Estruturas e Construção Civil) – Universidade de Brasília, Brasília, 2017.

AYOBAMI, A.B. **Performance of wood bottom ash in cement-based applications and comparison with other selected ashes: Overview.** Resources, Conservation & Recycling,

166, p.105351, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2020.105351>. Acesso em: 27 jun. 2025.

AQUINO, J. F. de. **Incorporação de cinzas de resíduos agrícolas como adição mineral com atividade pozolânica em matrizes cimentícias - uma revisão da literatura**. 2021. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Civil) - Centro Universitário Christus - Unichristus, Fortaleza, 58pg., 2021.

ARRUDA, Flávia Favacho et al. **Absorção por capilaridade em concreto produzido com adição de sílica ativa**. In: Congresso Técnico Científico de Engenharia e da Agronomia - CONTECC'2018, Maceió - AL, 2018.

BLENGINI, G. A.; GARBARINO, E. Gestão de recursos e resíduos em Torino (Itália): O papel dos agregados reciclados no mix de abastecimento sustentável. **Journal of Cleaner Production**, 2010. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0959652610000387>>. Acesso em: 24 abr. 2024.

BRASILEIRO, L. L.; MATOS, J. M. E. **Revisão bibliográfica: reutilização de resíduos da construção e demolição na indústria da construção civil**. *Cerâmica*, v. 61, p. 178-189, 2015. Disponível em: <<https://dx.doi.org/10.1590/0366-69132015613581860>>. Acesso em: 24 abr. 2024.

BRITO, B. R. de. **Efeito da incorporação de vidro de garrafas não retornáveis em matriz cimentícia**. 2021. Dissertação (Mestrado em Ciências e Tecnologia de Materiais) - Universidade Estadual Paulista "Júlio de Mesquita Filho", Campus de Bauru, 2021.

BUENO, Roberto Munhoz. **A influência do óxido de grafeno e da sílica coloidal nas propriedades químicas e mecânicas de matrizes cimentícias**. 2020. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade São Judas Tadeu, São Paulo, 2020.

CAMPOS, M. A.; PASSOS, L.; ARGOLLO FERRÃO, A. M. de; MORENO JUNIOR, A. L. Resíduos dos polos cerâmicos paulistas: problema territorial e alternativa para a produção de matrizes cimentícias. **Conjecturas**, [S. l.], v. 22, n. 2, p. 358–380, 2022. DOI: 10.53660/CONJ-621-717. Disponível em: <https://conjecturas.org/index.php/edicoes/article/view/621>. Acesso em: 7 maio. 2024.

CARVALHO, J.L.V.; SILVA, A.C.; SILVA, E.M.S., Caracterização Físico-Química de Cinzas de Resíduos Perigosos para Uso na Construção Civil. **Revista Matéria**, v.27, n.4, 2022.

CARVALHO, P. A.; SILVA, J. V. M. de A.; DIODATO, J. O. Substituição parcial do cimento Portland por cinza do bagaço da cana-de-açúcar na produção de concreto. **GEOFRONTER**, [S. l.], v. 11, p. e8650, 2025. DOI: 10.61389/geofronter.v11.8650.

Disponível em: <https://periodicosonline.uems.br/GEOF/article/view/8650>. Acesso em: 8 jul. 2025.

CIMPOR. Processo de Fabrico. Disponível em: https://www.cimpor.com/cimento#processo_de_fabrico. Acesso em: 27 de mai. 2024.

CIRINO, M. A. G. **Estudo de pastas de cimento Portland com adições de cinzas de carvão mineral para uso na cimentação de poços de petróleo**. 2016. 132 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil: Estruturas e Construção Civil)–Centro de Tecnologia, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2016

COSTA, E. B. C.; BARROS, B. P.; COSTA, M. R. M. M. da. (2020). Influência da granulometria e do teor de resíduo de polimento de placas cerâmicas na resistência mecânica de matrizes cimentícias. **Matéria** (Rio Janeiro), 25(04). Disponível em: <<https://doi.org/10.1590/S1517-707620200004.1167>>. Acesso em: 13 mai. 2024.

COSTA, H. N. et al. Comportamento no estado fresco e no estado endurecido de pastas de cimentos álcali-ativados de cinza volante e de cinza pesada e suas características microestruturais. **Ambiente Construído**, 23(3), 683-699, 2023. <https://doi.org/10.1590/s1678-86212023000300683>. Acesso em: 20 jun. 2024.

CRIADO, T. C.; PAGOTO, L. M.; PEREIRA, A. M. **Concretos especiais em construção civil: desempenho, resistência e inovação**. *Materiais de Engenharia: fundamentos e novas tendências*. 2024. DOI: 10.37885/240817480.

DE BRITO, B. L. F. **Reaproveitamento de Rejeito Culinítico como Material Pozolânico**. 2020. 82 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Curso de Graduação em Engenharia Química) – Escola de Química, Rio de Janeiro, 2020.

DE SANTANA, E. R. R, et al. Caracterização De Cinzas Sulfatadas De Carvão Visando Utilização Na Indústria De Cimento - **Reconstrução Mineralógica do Carvão de Candiota** (Brasil). 2011.

DIAMOND, S. (2000). The role of calcium hydroxide in the autoclave expansion of portland cement paste. **Cement and Concrete Research**, 30(10), 1627-1631. doi:10.1016/S0008-8846(00)00349-7

EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARDIZATION (CEN). **EN 206-1:2013+A1:2023 Concrete - Part 1: Specification, Performance, Production and Conformity**. European Committee for Standardization, 2023.

FARIAS, Marcelo Miranda. **Celulose nanofibrilada em compósito de cimento Portland: transformações físico-químicas, microestruturais e análise do potencial de mitigação de**

reação álcali-agregado. 2022. Dissertação (Mestrado em Engenharia e Ciência dos Materiais) – Universidade Estadual de Ponta Grossa, Ponta Grossa, 2022.

FELÍCIO, Í. B. R. **Uso da castanha de caju na construção civil.** 2018. Monografia (Bacharelado em Ciência e Tecnologia) - Universidade Federal Rural do Semi-Árido, Mossoró, 2018.

FERNANDES, A. J. M. M. **Influência do teor de sílica e alumina no comportamento pozolânico de materiais cimentícios suplementares.** 2018. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade do Vale do Rio dos Sinos, São Leopoldo, 2018. Disponível em: <http://www.repositorio.jesuita.org.br/handle/UNISINOS/7154>. Acesso em: 20 jun. 2024.

FIGUEIREDO, F. B. **Caracterização da cinza do bagaço da fécula de mandioca para emprego em matrizes cimentícias.** 2023. 97 páginas. Tese (Doutorado em Ciência e Tecnologia Ambiental) - Universidade Federal da Grande Dourados, Programa de Pós-Graduação em Ciência e Tecnologia Ambiental, Dourados, Mato Grosso do Sul.

FIGUEIREDO, P. F. **Reação Álcali-Agregado em Material Álcali-Ativado com Uso de Cinza de Bagaço de Cana de Açúcar como Precursor.** 2023. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Materiais) - Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais, Belo Horizonte, 85pg, 2023.

FIGUEIREDO, A.; KUSTER, L. **Materiais Cimentícios Suplementares: alto desempenho tecnológico.** 2019. Universidade Federal de Ouro Preto. Disponível em: <<https://reciclos.ufop.br/news/materiais-cimenticios-suplementares-alto-desempenho-tecnologico>>. Acesso em: 15 mai. de 2024.

FORMIGONI, M. W. et al. (2019). Substituição do cimento Portland por resíduo de placa cerâmica em argamassa. **Tecnol. Metal. Mater. Min.**, 16(1), 62-67. Disponível em: <<https://doi.org/10.4322/2176-1523.20191605>>. Acesso em: 13 mai. de 2024.

Fundação João Pinheiro. Déficit habitacional no Brasil – 2016-2019. Belo Horizonte: FJP, 2021. 169 p. (Inclui bibliografia). CDU 333.32(81) “2016/2019”.

GCC Association. Cement Industry Net Zero Progress [online]. Disponível em: <<https://gccassociation.org/cement-industry-net-zero-progress/>>. Acesso em: 24 abr. 2024.

GONÇALVES, Beatriz. **Evolução de fases durante a hidratação do cimento Portland brasileiro por difração de raios X.** 2021. Dissertação (Mestrado em Ciência e Engenharia de Materiais) - Universidade Federal de São Carlos, Centro de Ciências Exatas e de Tecnologia, Programa de Pós-Graduação em Ciência e Engenharia de Materiais, São Carlos, 2021.

JENNINGS, H. M. (2008). A model for the microstructure of calcium silicate hydrate in cement paste. **Cement and Concrete Research**, 38(3), 352-360. doi:10.1016/j.cemconres.2007.11.008

JOHN, V. M. (2017). Materiais de Construção e o Meio Ambiente. In: Isaia, G. (Ed.). Materiais de construção civil e princípios de ciência e engenharia de materiais. Versão editada. IBRACON.

JOSE, A. et al. Characterization of cement stabilized pond ash using FTIR spectroscopy. **Construction and Building Materials**, v. 263, 120136, 2020.

LIMA, D. O. de. **Avaliação da incorporação de finos de resíduos de construção e demolição (RCD) em matrizes cimentícias binárias e ternárias**. 2023. 132 f. Tese (Doutorado em Desenvolvimento, Caracterização e Aplicação de Materiais com foco no Agronegócio) - Faculdade de Zootecnia e Engenharia de Alimentos, Universidade Federal de São Paulo, Pirassununga, 2023. Disponível em: <<https://doi.org/10.11606/T.74.2023.tde-28022024-100527>>. Acesso em: 20 jun. 2024.

LIMA, S. A.; ROSSIGNOLO, J. A. Avaliação da estabilidade dimensional e da durabilidade de argamassas confeccionadas com adição de cinza da casca da castanha de caju. **Conexões - Ciência e Tecnologia**, [S. l.], v. 3, n. 1, p. 22–29, 2009. DOI: 10.21439/conexoes.v3i1.125. Disponível em: <https://conexoes.ifce.edu.br/index.php/conexoes/article/view/125>. Acesso em: 24 abr. 2024.

LIMA, S. A. Estudo das características químicas e físicas da cinza da casca da castanha de caju para uso em materiais cimentícios. **Acta Scientiarum. Technology**, v. 32, n. 4, p. 383-389, 2010. ISSN: 1806-2563. Disponível em: <<https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=303226529004>>. Acesso em: 24 abr. 2024.

LIMA, S. A. **Análise da viabilidade do uso de cinzas agroindustriais em matrizes cimentícias: estudo de caso da cinza da casca da castanha de caju**. São Carlos, 2008. Dissertação (Mestrado) – Programa de Pós-Graduação em Arquitetura e Urbanismo e Área de Concentração em Arquitetura, Urbanismo e Tecnologia – Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo, 2008.

LIU, Y. et al. Water-based drill cuttings, a shale gas extraction waste as supplementary cementitious material and optimization. **Construction and Building Materials**, v. 346, n. June, 177p. 128419, 2022b.

LOPES, C. de M. N. **Revisão bibliométrica e mapeamento dos resíduos mais utilizados em matrizes cimentícias no Brasil**. 2023. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade Federal de Ouro Preto, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Ouro Preto, 2023.

MACIEL, K. R. D. **Desenvolvimento de aplicações em cerâmica e pasta de cimento utilizando o cascalho de perfuração de poços de petróleo na construção civil**. 2023. Tese (Doutorado em Centro Interdisciplinar de Energia e Ambiente) - Universidade Federal da Bahia, Salvador, 206 pg., 2023.

MARTINS, A. B. B. **Incorporação de cinzas de caldeiras em matriz cimentícia para produção de argamassa**. 2022. Dissertação (Pós-Graduação em Ciências e Tecnologia de Materiais) – Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”, Presidente Prudente, 2022.

MARTINS, M. M. **Investigação da influência do uso de materiais cimentícios suplementares utilizados em substituição parcial ao cimento Portland**. 2018. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Civil) - Universidade do Sul de Santa Catarina, Tubarão, 2018.

MATOS, Samile Raiza Carvalho; GUIMARÃES, Cleidson Carneiro. Utilização da cinza da casca do coco verde como substituição parcial do cimento Portland em argamassas. **REEC – Revista Eletrônica de Engenharia Civil**, v. 13, n. 1, p. 251-269, 2017. Disponível em: <https://revistas.ufg/reec/index>. Acesso em: 16 ago. 2024.

MERCADO, L. F. B.; BARBOZA, C. S. Análise do uso de concreto com incorporação de pó de borracha: uma revisão da literatura. In: ENCONTRO NACIONAL DE TECNOLOGIA DO AMBIENTE CONSTRUÍDO, 19., 2022. **Anais [...]**. Porto Alegre: ANTAC, 2022. p. 1–16. DOI: 10.46421/entac.v19i1.2232. Disponível em: <https://eventos.antac.org.br/index.php/entac/article/view/2232>. Acesso em: 24 abr. 2024.

MEHTA, P. K.; MONTEIRO, P. J. M. *Concrete: Microstructure, Properties, and Materials*. 3rd ed. New York: McGraw-Hill Education, 2014.

MEDEIROS, J. A.; TORRES, S. M. O cimento Portland do século XIX e as ruínas que testemunham o pioneirismo brasileiro na indústria cimenteira da América Latina. Publicado em setembro de 2019. Disponível em: <https://www.researchgate.net/publication/335986239>. Acesso em: 27 mai. 2024.

MEDEIROS, J. L. G. de; MORAIS, C. R. da S. **Aplicação de técnicas termoanalíticas (TGA/DTA) para avaliação do comportamento térmico de amostras de argilas para obtenção de pozolanas**. João Pessoa, 2020.

MEDEIROS, V. A. S.; CRUZ, B. R. de S.; ALCAZAS, J. C.; MILANI, A. P. da S. (2021). Previsão do impacto da adição de resíduo de borracha de pneu no desempenho mecânico do concreto. In: **Encontro Nacional de Aproveitamento de Resíduos na Construção**, 7., 2021. **Anais [...]**. [S. l.], 2021. p. 1–8. Disponível em: <https://eventos.antac.org.br/index.php/enarc/article/view/3340>. Acesso em: 24 abr. 2024.

MORETTI, J. P. (2018). **Incorporação de descarte agroindustrial em matrizes cimentícias**. Tese de doutorado, Universidade Federal de São Carlos - UFSCar. Recuperado de: <<https://repositorio.ufscar.br/handle/ufscar/9935>>. Acesso em: 24 abr. 2024.

MOSSMANN, L. M. **Avaliação da resistência mecânica em argamassas com adição de finos de tijolos e carvão vegetal**. 2024. 1. Dissertação (Mestrado em Tecnologia e Engenharia de Materiais) - Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Rio Grande do Sul, Vale do Caí, RS, 2024. Disponível em: <https://dspace.ifrs.edu.br/xmlui/handle/123456789/1053>. Acesso em: 20 jun. 2024.

MOURA, A. S. de; DA COSTA, H. N.; CABRAL, A. E. B. Avaliação de concretos com uso de resíduo de cerâmica vermelha como material cimentício suplementar. In: **CONGRESSO LUSO-BRASILEIRO DE MATERIAIS DE CONSTRUÇÃO SUSTENTÁVEIS, 5.**, 2024, Lisboa. Anais... Lisboa: [s.n.], 2024.

NAGIREDDI, S.; AGARWAL, J. R.; VEDAPURI, D. **Captura, utilização e sequestro de dióxido de carbono: situação atual, desafios e perspectivas futuras para a descarbonização global**. *ACS Eng. Au*, v. 4, n. 1, p. 22-48, 1 dez. 2023. Disponível em: <https://doi.org/10.1021/acseengineeringau.3c00049>. Acesso em: 20 jun. 2024.

NOBRE, T. R. S. et al. Caracterização de fases de cimento Portland por meio das técnicas de difratometria de raios X e espectroscopia de ressonância magnética nuclear de ²⁹Si no estado sólido. **Revista IPT | Tecnologia e Inovação**, v. 6, n. 19, mai. 2022. Disponível em: http://www.ipt.br/publicacoes/revistas/rtei/edicoes/2022/19_Caracterizacao_de_fases_de_cimento_Portland.htm. Acesso em: 20 jun. 2024.

OLIVEIRA, C. C.; TIECHER, F. Avaliação do comportamento de concretos contendo cinza de casca de arroz frente à autocicatrização. **Revista de Arquitetura IMED**, Passo Fundo, v. 12, n. 1, p. 121-129, jan.-jun. 2023. ISSN 2318-1109. DOI: <<https://doi.org/10.18256/2318-1109.2023.v12i1.4955>>. Acesso em: 24 abr. 2024.

PELÁEZ, M. C. História da industrialização brasileira. Rio de Janeiro: APEC, 1972.

PEREIRA, Cecília Cassimiro et al. **Caracterização química e física de pastas comerciais elaboradas com matérias-primas oleaginosas**. 2020. DOI: 10.37885/200800928.

Presidência da República Federativa do Brasil. Secretaria-Geral. Subchefia para Assuntos Jurídicos. Decreto nº 10.936, de 12 de janeiro de 2022. Regulamenta a Lei nº 12.305, de 2 de agosto de 2010, que institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos. Brasília, DF, 2022. Disponível em: https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2019-2022/2022/decreto/D10936.htm. Acesso em: 31 mai. 2024.

PINETOWN, K.L. ; Ward, C.R.; Westhuizen, W.V. van der. **Quantitative evaluation of minerals in coal deposits in Witbank and Highveld Coalfields, and the potential impact on acid mine drainage.** International Journal of Coal Geology, v. 70, p.166-183, 2007.

PILLAI, R. G.; GETTU, R.; SANTHANAM, M. **Uso de materiais cimentícios suplementares (SCMs) em sistemas de concreto armado - Benefícios e limitações.** Rev. ALCONPAT, Mérida , v. 10, n. 2, p. 147-164, agosto 2020 . Disponível em: <http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S2007-68352020000200002&lng=es&nrm=iso>. acessado em 06 jul. 2025. Epub 23-Mayo-2022. <https://doi.org/10.21041/ra.v10i2.477>. Acessado em Maio 2025.

PIRES, P. J. M. **Utilização de Cascalho de Perfuração de Poços de Petróleo para a Produção de Cerâmica Vermelha.** 2009. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) - Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2009.

POLLNOW, Edilson Nunes et al. **Propriedades físico-químicas de compósitos cimentícios reforçados por fibras naturais obtidos com diferentes composições de cimento.** In: CONGRESSO DE INICIAÇÃO CIENTÍFICA, 21., 4ª MOSTRA CIENTÍFICA, 2018, Universidade Federal de Pelotas, 2018.

REIS, M. C. dos; ZAMPIERON, J. V.; SERRA, S. M. B. Reaproveitamento de resíduos agroindustriais em matrizes cimentícias. In: **SENGI - Simpósio de Engenharia, Gestão e Inovação**, 2., 2019, Águas de Lindóia - SP. Anais do II SENGI.

RESENDE, Heron Freitas et al. Uso de resíduos de construção e demolição como agregado reciclado no concreto: uma breve revisão de literatura. **Revista Principia - Divulgação Científica e Tecnológica do IFPB**, João Pessoa, out. 2022. ISSN 2447-9187. Disponível em: <<https://periodicos.ifpb.edu.br/index.php/principia/article/view/7086>>. Acesso em: 24 abr. 2024. DOI: 10.18265/1517-0306a2022id7086.

RIBEIRO, U.,G.; SOUZA, C.O.; GRONDONA, A.E. Desempenho mecânico e durabilidade de argamassas contendo adições de resíduos de carvão vegetal amazônico, et al., **Revista Matéria**, v.26, n.3, 2021.

RODRIGUES, M. S. **Avaliação de cinzas de palha de cana-de-açúcar e sua utilização como adição mineral em matrizes cimentícias.** 2012. Tese (Doutorado em Engenharia Agrícola) - Universidade Estadual de Campinas, Faculdade de Engenharia Agrícola, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola, Campinas, 152 pg, 2012.

RODRIGUES, M. S.; BERALDO, A. L. Caracterização física e mecânica de argamassas à base de cimento Portland e cinza de casca de arroz residual. **Engenharia Agrícola**, Jaboticabal, v. 30, n. 2, p. 193-204, mar./abr. 2010.

SALVADOR FILHO, J. A. A. et al. Influência da utilização do pó de vidro em substituição ao cimento Portland na resistência à compressão de matrizes cimentícias de ultra alta resistência. In: **Anais do 59º Congresso Brasileiro do Concreto - CBC2017**. São Paulo: IBRACON, 2017.

SANTI, A. M. M.; SEVÁ FILHO, A. O. Combustíveis e riscos ambientais na fabricação de cimento: casos na Região do Calcário ao Norte de Belo Horizonte e possíveis generalizações. In: Encontro da ANPPAS - Associação Nacional de Pós-Graduação e Pesquisa em Ambiente e Sociedade, 2., 2004, Piracicaba. Anais... Encontro da ANPPAS, 2004. p.1-18. Disponível em: <http://www.ifch.unicamp.br/profseva/anppas04_SantiSeva_cimento_RMBH.pdf>. Acesso em: 28 de mai. 2024.

SANTOS, J. V. et al. Efeitos da adição e substituição de cinza do bagaço da cana-de-açúcar em matrizes cimentícias / Efeitos da adição e substituição de cinza de pasta de cana-de-açúcar em matrizes cimentícias. **Revista Brasileira de Desenvolvimento**, [S. l.], v. 10, pág. 77494–77509, 2020. DOI: 10.34117/bjdv6n10-250. Disponível em: <<https://ojs.brazilianjournals.com.br/ojs/index.php/BRJD/article/view/18143>>. Acesso em: 24 abr. 2024.

SANTOS, L. B. **A importância do setor mineral no desenvolvimento econômico de Itapeva/SP: estudo de caso da Fábrica de Cimento Lafarge**. 2005. (Monografia em Geografia) - Faculdade de Ciências e Tecnologia, Universidade Estadual Paulista, Presidente Prudente, 2005.

SANTOS, L. B. A indústria de cimento no Brasil: origens, consolidação e internacionalização. (Artigo Científico) - Sociedade & Natureza, Uberlândia, v. 23, n. 1, p. 77-94, abr. 2011. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/S1982-45132011000100007>. Acesso em: 26 mai. 2024.

SANTOS, L. H. Os impactos ambientais na fabricação do cimento. LinkedIn, 20 jul. 2019. Disponível em: <https://pt.linkedin.com/pulse/os-impactos-ambientais-na-fabrica%C3%A7%C3%A3o-do-cimento-lucas-hernanes-santos>. Acesso em: 04 jun. 2024

SCRIVENER, K.; SNELLINGS, R. (2018). Supplementary cementitious materials: Introduction and hydration. **Cement and Concrete Research**, 114, 1-14. doi:10.1016/j.cemconres.2018.08.015

SEEG (Sistema de Estimativas de Emissões de Gases de Efeito Estufa). Plataforma SEEG. Disponível em: <https://plataforma.seeg.eco.br/?_gl=1*19rrwxv*_ga*NzM1NDEwMTQ0LjE3MTc1Mzk3NzY.*_ga_XZWSWEJDWQ*MTcxNzUzOTc3NS4xLjAuMTcxNzUzOTc3NS4wLjAuMA..>>. Acesso em: 04 jun. 2024.

SILVA, Elton Clementino da; PAOLA, Maria Valéria Robles Velasco de; MATOS, Jivaldo do Rosário. **Análise térmica aplicada à cosmetologia**. Revista Brasileira de Ciências Farmacêuticas, São Paulo, v. 43, n. 3, 2007.

SILVA, G. T. de M. et al. Resíduos de construção e demolição em tecnologia de concreto: uma revisão. **Brazilian Journal of Development**, Curitiba, v. 6, n. 7, p. 46883-46896, jul. 2020. DOI: 10.34117/bjdv6n7-357.

SILVA, L. S. et al. Concreto alternativo com utilização de resíduos de borracha de recauchutagem de pneus para elementos e componentes pré-fabricados. **Revista de Ciência e Tecnologia**, [S.l.], v. 5, n. 8, p. 1-7, jul. 2019. DOI: <https://doi.org/10.18227/rct.v5i8.5071>. Disponível em: <<https://revista.ufr.br/rct/article/view/5071>>. Acesso em: 24 abr. 2024.

SILVA, Sabrina Neves da, LOPES, Daniela Ferreira. **Caracterização de Cinzas Volantes de Carvão Mineral para Aproveitamento em Matrizes Cimentícias**. In: Open Science Research III, Bagé, 2022.

SILVA, L. S. da. Indústria Brasileira do Cimento: Consumo e Impactos Ambientais. *Revista Construindo*, Belo Horizonte, v. 14, n. 1, p. 43-52, jan./jun. 2022. ISSN 2175-7143 (impressa). Disponível em: <http://www.fumec.br/revistas/construindo/index>. Acesso em: 26 mai. 2024.

SILVA, J. A. da. **Reologia de pastas cimentícias com cinza de casca de arroz**. 2020. 100 f. Dissertação (Mestrado em Materiais para Engenharia) - Universidade Federal de Itajubá, Programa de Pós-Graduação em Materiais para Engenharia, Itajubá, 2020. Disponível em: <<https://repositorio.unifei.edu.br/jspui/handle/123456789/2250>>. Acesso em: 24 abr. 2024.

SIQUEIRA, J. S. de. **Reciclagem de Resíduo a Partir de Cinza de Fundo de Cravão Mineral: Produção de Argamassas**, 2011; Dissertação (Mestrado em Engenharia Química) - Universidade Federal do Pará, Fundação Amazônia Paraense de Amparo à Pesquisa.

SIMÕES, L. J. et al. **Caracterização do resíduo de vidro laminado de parabrisas para utilização como substituto parcial do cimento em matrizes cimentícias**. *Teoria e Prática na Engenharia Civil*, n. 22, p. 43-49, out. 2013.

SINDICATO NACIONAL DA INDÚSTRIA DO CIMENTO. Relatório Roadmap. 2020. Disponível em: <<http://snic.org.br/relatorio-roadmap.php>>. Acesso em: 23 abr. 2024.

SINDICATO NACIONAL DA INDÚSTRIA DO CIMENTO (SINIC). Relatório Anual 2022. São Paulo, SP: SNIC, 2022. Disponível em: <http://www.snic.org.br>. Acesso em: 26 mai. 2024

TAYLOR, H. F. W. **Cement Chemistry**. 2nd ed. London: Thomas Telford Publishing, 1997.

TOLEDO, J. F. **Estudo da reatividade do resíduo de ardósia como adição em matrizes cimentícias**. 2016. Monografia (Graduação em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Ouro Preto, Escola de Minas, Departamento de Engenharia Civil, Ouro Preto, 2016.

TORRES, S. M. **Aplicação Da Difração De Raios X Na Análise Do Potencial Pozolânico Da Cinza Do Bagaço Da Cana-de-açúcar Para Adição Ao Cimento Portland**, 2019. Dissertação (Programa de Pós-Graduação Em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Pernambuco, Departamento de Engenharia Civil, Recife, 2019

United States Environmental Protection Agency (USEPA) - **Portland Cement Manufacturing Industry: National Emission Standards for Hazardous Air Pollutants (NESHAP)**, 2025. EPA. s.d. Disponível em: <https://www.epa.gov/stationary-sources-air-pollution/portland-cement-manufacturing-industry-national-emission-standards>. Acesso em: 8 jul. 2025.

USDA – United States Department of Agriculture. *FoodData Central*. Disponível em: <https://fdc.nal.usda.gov/>. Acesso em: 30 jul. 2025.

WORLD BUSINESS COUNCIL FOR SUSTAINABLE DEVELOPMENT, (WBCSD). *Toward a sustainable cement industry. Substudy 8: climate change*. By Ken Humphreys and Maha Mahasenana. 2002a.

WORLD BUSINESS COUNCIL FOR SUSTAINABLE DEVELOPMENT, (WBCSD). *The cement sustainability initiative, our agenda for action*. 2002b

Zhen, G.; Lu, X.; Zhao, Y.; Niu, J.; Chai, X.; Su, L.; Li, Y.Y.; Liu, Y.; Du, J.; Hojo, T.; et al. Characterization of controlled low-strength material obtained from dewatered sludge and refuse incineration bottom ash: **Mechanical and microstructural perspectives**. *J. Environ. Manag.*, 129, 183–189, 2013.

ZOTTIS, A. L.; POSSAN, E.; HASPARYK, N. P. **Avaliação da capacidade de autocicatrização de argamassas especiais contendo adições pozolânicas e agentes biológicos incorporados em casca de arroz**. 2023. 58 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade Federal da Integração Latino-Americana, Foz do Iguaçu, 2023. Disponível em: <https://dspace.unila.edu.br/handle/123456789/7756>. Acesso em: 20 jun. 2024.