

UNIVERSIDADE FEDERAL DO PAMPA
CURSO DE ENGENHARIA QUÍMICA

BRUNO RAFAEL SOARES MARQUES

**INVESTIGAÇÃO DO USO DA CINZA PESADA DE CANDIOTA-RS
COMO MATÉRIA-PRIMA PARA GEOPOLÍMEROS**

Bagé

2026

BRUNO RAFAEL SOARES MARQUES

**INVESTIGAÇÃO DO USO DA CINZA PESADA DE CANDIOTA-RS
COMO MATÉRIA-PRIMA PARA GEOPOLÍMEROS**

Trabalho de Conclusão de Curso
apresentado ao Curso de Engenharia
Química da Universidade Federal do
Pampa, como requisito parcial para
obtenção do título de Bacharel em
Engenharia Química.

Orientadora: Prof^a. Dr^a. Ana Rosa Costa
Muniz

Bagé

2026

Ficha catalográfica elaborada automaticamente com os dados fornecidos
pelo(a) autor(a) através do Módulo de Biblioteca do
Sistema GURI (Gestão Unificada de Recursos Institucionais).

M357i Marques, Bruno Rafael Soares

Investigação do uso da cinza pesada de Candiota-RS
como matéria-prima para geopolímeros / Bruno Rafael
Soares Marques.

106p.

Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação)–
Universidade Federal do Pampa, ENGENHARIA QUÍMICA,
2026.

“Orientação: Ana Rosa Costa Muniz”.

1. Cinza pesada. 2. Candiota-RS. 3. Geopolímeros. 4.
Metacaulim. 5. Ativação Alcalina. I. Título



SERVIÇO PÚBLICO FEDERAL
MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
Universidade Federal do Pampa

BRUNO RAFAEL SOARES MARQUES

**INVESTIGAÇÃO DO USO DA CINZA PESADA DE CANDIOTA-RS
COMO MATÉRIA-PRIMA PARA GEOPOLÍMEROS**

Trabalho de Conclusão de Curso
apresentado ao Curso de Engenharia
Química da Universidade Federal do
Pampa, como requisito parcial para
obtenção do Título de Bacharel em
Engenharia Química.

Trabalho de Conclusão de Curso defendido e aprovado em: 10 de julho de 2026.

Banca examinadora:

Prof^a. Dr^a. Ana Rosa Costa Muniz
Orientadora
UNIPAMPA

Prof. Dr. Alexandre Ferreira Galio
UNIPAMPA

Profª. Drª. Sabrina Neves da Silva
UNIPAMPA



Assinado eletronicamente por **ANA ROSA COSTA MUNIZ, PROFESSOR DO MAGISTERIO SUPERIOR**, em 15/07/2026, às 10:30, conforme horário oficial de Brasília, de acordo com as normativas legais aplicáveis.



Assinado eletronicamente por **ALEXANDRE FERREIRA GALIO, PROFESSOR DOMAGISTERIO SUPERIOR**, em 15/07/2026, às 10:32, conforme horário oficial de Brasília, de acordo com as normativas legais aplicáveis.



Assinado eletronicamente por **SABRINA NEVES DA SILVA, PROFESSOR DO MAGISTERIO SUPERIOR**, em 15/07/2026, às 10:43, conforme horário oficial de Brasília, de acordo com as normativas legais aplicáveis.



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site https://sei.unipampa.edu.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0, informando o código verificador **2093757** e o código CRC **BE436AB5**.

Referência: Processo nº 23100.011579/2026-51 SEI nº 2093757

RESUMO

A geração termelétrica a carvão mineral está associada à formação de resíduos sólidos de natureza mineral, cuja disposição inadequada pode representar riscos ambientais e custos operacionais. Nesse contexto, este Trabalho avaliou o uso da cinza pesada de Candiota-RS como componente parcial em formulações geopoliméricas à base de metacaulim. O carvão mineral de partida foi caracterizado por análise imediata e poder calorífico superior, apresentando teor de cinzas de 55,00% e poder calorífico de $12,66 \text{ MJ}\cdot\text{kg}^{-1}$, evidenciando elevada fração mineral. A cinza pesada foi preparada por peneiramento, com seleção da fração passante de abertura 0,248 mm, seguida de secagem e homogeneização, visando reduzir a heterogeneidade física do resíduo. A composição química da cinza indicou caráter silicoaluminoso, com 40,9% de SiO_2 e 10,8% de Al_2O_3 , além de teores relevantes de CaO , SO_3 , MgO e Fe_2O_3 , enquanto os espectros Raman apresentaram bandas em aproximadamente 472 cm^{-1} e 1006 cm^{-1} , associadas a espécies silicatadas e sulfatadas. As formulações foram produzidas pelo método de mistura a seco, com relação molar nominal Si/Al de 1,8, relação água/sólidos de 0,5 e $\text{NaOH } 10 \text{ mol}\cdot\text{L}^{-1}$. Foram avaliadas as formulações RefM10, sem cinza, D05M10, com 5%, e D10M10, com 10%. Os corpos de prova cilíndricos de $40 \times 80 \text{ mm}$ foram moldados em tubos de PVC, mantidos em temperatura ambiente e desmoldados antes do ensaio de compressão. A D05M10 apresentou o melhor desempenho mecânico, com 18,22 MPa aos 7 dias e 18,59 MPa aos 14 dias. A RefM10 evoluiu de 12,91 para 15,41 MPa, enquanto a D10M10 passou de 12,12 para 15,30 MPa. Os resultados indicam que a incorporação de 5% do resíduo favoreceu o desempenho mecânico inicial, possivelmente por efeito de preenchimento e empacotamento da matriz, enquanto o teor de 10% apresentou desenvolvimento mais lento.

Palavras-chave: metacaulim; ativação alcalina; resíduos carboníferos; materiais ligantes; resistência à compressão.

ABSTRACT

Coal-fired thermoelectric power generation is associated with the formation of mineral solid residues, whose improper disposal may pose environmental risks and operational costs. In this context, this study evaluated the use of bottom ash from Candiota–RS as a partial component in metakaolin-based geopolymer formulations. The source coal was characterized by proximate analysis and higher heating value determination, showing an ash content of 55.00% and a heating value of 12.66 MJ·kg⁻¹, indicating a high mineral fraction. The bottom ash was prepared by sieving, selecting the fraction passing through a 0.248 mm aperture, followed by drying and homogenization, aiming to reduce the physical heterogeneity of the residue. The chemical composition of the ash indicated a silicoaluminous character, with 40.9% SiO₂ and 10.8% Al₂O₃, in addition to relevant contents of CaO, SO₃, MgO, and Fe₂O₃, while the Raman spectra showed bands at approximately 472 cm⁻¹ and 1006 cm⁻¹, associated with silicate and sulfate species. The formulations were produced by the dry-mixing method, with a nominal Si/Al molar ratio of 1.8, a water-to-solids ratio of 0.5, and 10 mol·L⁻¹ NaOH. The formulations evaluated were RefM10, without ash, D05M10, with 5%, and D10M10, with 10%. Cylindrical specimens measuring 40 × 80 mm were cast in PVC molds, kept at room temperature, and demolded before the compression test. D05M10 showed the best mechanical performance, with 18.22 MPa at 7 days and 18.59 MPa at 14 days. RefM10 increased from 12.91 to 15.41 MPa, while D10M10 increased from 12.12 to 15.30 MPa. The results indicate that the incorporation of 5% residue favored the initial mechanical performance, possibly due to a filling and particle-packing effect in the matrix, whereas the 10% content showed slower strength development.

Keywords: metakaolin; alkaline activation; coal residues; binder materials; compressive strength.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Representação esquemática da evolução do carvão mineral	20
Figura 2 - Esquema simplificado de uma usina termelétrica a carvão	23
Figura 3 - Esquema da formação da cinza pesada no fundo da caldeira	26
Figura 4 - Mapa visual das aplicações tecnológicas da cinza pesada	29
Figura 5 - Representação esquemática do mecanismo de geopolimerização	32
Figura 6 - Fluxograma geral das etapas metodológicas	43
Figura 7 - Solução comercial Sicol 30 e material silicatado sólido	46
Figura 8 - Preparo da fonte silicatada sólida a partir da solução de Sicol 30	47
Figura 9 - Sistema de calorimetria Parr 6200 com bomba calorimétrica	50
Figura 10 - Sistema de peneiramento utilizado no preparo físico da cinza pesada	51
Figura 11 - Estufa utilizada na secagem da fração passante da cinza pesada	52
Figura 12 - Espectrômetro Raman utilizado na análise estrutural da cinza pesada	55
Figura 13 - Sistema de peneiramento utilizado na classificação granulométrica	57
Figura 14 - Composição percentual em massa das formulações geopoliméricas	62
Figura 15 - Fluxograma da produção das pastas geopoliméricas	65
Figura 16 - Moldes de PVC para obtenção dos corpos de prova geopoliméricos	68
Figura 17 - Corpos de prova geopoliméricos após 14 dias de cura	69
Figura 18 - Resposta Raman da cinza pesada em diferentes aberturas	83
Figura 19 - Máquina universal de ensaios EMIC DL 20000	86
Figura 20 - Curvas força-deformação aos 7 dias	88
Figura 21 - Curvas força-deformação aos 14 dias	89

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Planejamento dos corpos de prova geopoliméricos	59
Tabela 2 - Formulações geopoliméricas calculadas.....	62
Tabela 3 - Identificação dos corpos de prova geopoliméricos.....	68
Tabela 4 - Resultados da análise imediata do carvão mineral de partida	73
Tabela 5 - Condições e resultado do ensaio de poder calorífico superior	74
Tabela 6 - Comparação do poder calorífico do carvão mineral	74
Tabela 7 - Distribuição granulométrica da cinza pesada.....	76
Tabela 8 - Perfil químico dos materiais geopoliméricos	78
Tabela 9 - Resistência à compressão das formulações aos 7 dias.....	87
Tabela 10 - Resistência à compressão das formulações aos 14 dias.....	87
Tabela 11 - Comparação da resistência à compressão	92

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 - Principais bandas Raman observadas na cinza pesada	84
Quadro 2 - Efeito da cinza pesada em matrizes ligantes	91

LISTA DE SIGLAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ANEEL	Agência Nacional de Energia Elétrica
ASTM	<i>American Society for Testing and Materials</i>
C-A-S-H	Gel cálcio-alumino-silicato-hidratado
CBA	<i>Coal Bottom Ash</i>
C-(N)-A-S-H	Gel cálcio-(sódio)-alumino-silicato-hidratado
C-S-H	Gel cálcio-silicato-hidratado
D05M10	Formulação geopolimérica com 5% de cinza pesada e NaOH 10 mol·L ⁻¹
D10M10	Formulação geopolimérica com 10% de cinza pesada e NaOH 10 mol·L ⁻¹
EPE	Empresa de Pesquisa Energética
FRX	Fluorescência de raios X
GGBFS	<i>Ground Granulated Blast Furnace Slag</i>
LEC	Laboratório de Energia e Carboquímica
MME	Ministério de Minas e Energia
MV	Materiais voláteis
N-A-S-H	Gel sódio-alumino-silicato-hidratado
NaOH	Hidróxido de sódio
NBR	Norma Brasileira
PCS	Poder calorífico superior
PVC	Policloreto de vinila
RefM10	Formulação geopolimérica de referência, sem cinza e NaOH 10 mol·L ⁻¹
ROM	<i>Run of Mine</i>
TCC	Trabalho de Conclusão de Curso
UNIPAMPA	Universidade Federal do Pampa
UTE	Usina Termelétrica

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	14
2	OBJETIVOS	17
2.1	Objetivo geral.....	17
2.2	Objetivos específicos.....	17
3	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	18
3.1	Carvão mineral.....	18
3.1.1	Definição e composição do carvão mineral	19
3.1.2	Classificação do carvão mineral	20
3.2	Geração de energia em termelétricas a carvão	21
3.3	Resíduos gerados na conversão termoquímica do carvão	24
3.4	Cinza pesada: formação, características e impactos ambientais	26
3.5	Aplicações tecnológicas da cinza pesada	28
3.6	Geopolímeros como ligantes alternativos	31
3.6.1	Fundamentos da geopolimerização e mecanismo de formação	31
3.6.2	Matérias-primas e parâmetros de formulação	33
3.6.3	Incorporação da cinza pesada em geopolímeros	35
3.7	Métodos de caracterização aplicados ao estudo	37
3.7.1	Caracterização do carvão de partida	37
3.7.2	Caracterização da cinza pesada.....	39
3.7.3	Avaliação mecânica dos geopolímeros.....	40
4	METODOLOGIA	42
4.1	Planejamento metodológico.....	43
4.2	Matérias-primas e reagentes	45
4.2.1	Preparo da fonte silicatada a partir da solução Sicol 30.....	46
4.3	Caracterização complementar do carvão mineral de partida	48
4.3.1	Análise imediata	48
4.3.2	Poder calorífico superior	49
4.4	Obtenção e preparo da cinza pesada	51
4.5	Caracterização da cinza pesada.....	52
4.5.1	Fluorescência de Raios X (FRX).....	53
4.5.2	Espectroscopia Raman	54
4.5.3	Classificação granulométrica.....	56

4.6	Planejamento das formulações geopoliméricas.....	57
4.7	Produção das pastas geopoliméricas por mistura a seco.....	63
4.8	Moldagem e cura dos corpos de prova	65
4.9	Ensaio de resistência à compressão	69
5	RESULTADOS E DISCUSSÃO	72
5.1	Caracterização complementar do carvão mineral de partida	72
5.2	Preparo físico e classificação granulométrica da cinza pesada	75
5.3	Caracterização química dos materiais por fluorescência de raios X...	78
5.4	Caracterização da cinza pesada por espectroscopia Raman.....	82
5.5	Resistência à compressão das matrizes geopoliméricas.....	86
6	CONSIDERAÇÕES FINAIS	96
6.1	Sugestões para futuros trabalhos	97
	REFERÊNCIAS	99

1 INTRODUÇÃO

A geração de energia elétrica a partir do carvão mineral ainda desempenha papel relevante em diferentes sistemas energéticos, especialmente em regiões onde a disponibilidade geológica desse recurso sustenta atividades de mineração e geração termelétrica. Embora sua participação na matriz elétrica brasileira seja inferior à de fontes renováveis, o carvão mantém importância regional, particularmente no sul do país, onde se localizam jazidas historicamente associadas ao aproveitamento energético. Entretanto, a combustão desse combustível fóssil está diretamente relacionada à emissão de gases poluentes e à geração de resíduos sólidos minerais, cuja disposição inadequada pode representar riscos ambientais e custos operacionais significativos (Nascimento; Soares, 2025).

Entre os resíduos gerados na combustão do carvão, destacam-se a cinza volante, a cinza pesada, a escória de caldeira e os materiais associados aos sistemas de controle ambiental. A cinza pesada, também denominada *coal bottom ash* (CBA), corresponde à fração mais grosseira da matéria mineral que se deposita nas regiões inferiores do sistema de combustão. Sua formação está associada às transformações térmicas sofridas pelos constituintes inorgânicos do carvão, incluindo decomposição, fusão parcial, aglomeração e resfriamento das partículas. Como consequência, esse resíduo apresenta composição e propriedades dependentes da origem do carvão, das condições de combustão e dos sistemas operacionais empregados (Adams, 2024; Aygün; Bilir; Uysal, 2024).

Do ponto de vista ambiental, a cinza pesada demanda atenção em razão do volume gerado e das formas tradicionais de disposição, que podem envolver áreas de armazenamento, cavas de mineração ou sistemas de deposição associados às usinas. Nessas condições, a mobilidade de constituintes químicos, a lixiviação de elementos potencialmente tóxicos e a ocupação de áreas para descarte tornam-se aspectos relevantes para a avaliação de risco ambiental. Assim, a gestão desse resíduo não deve ser limitada à disposição final, mas deve considerar estratégias de valorização capazes de reduzir passivos ambientais e ampliar sua inserção em cadeias produtivas de maior interesse técnico (Faraco *et al.*, 2025; Petrović; Fiket, 2022).

Sob a perspectiva tecnológica, a cinza pesada apresenta características que justificam sua investigação como matéria-prima alternativa em materiais de

construção e sistemas ligantes. Sua composição frequentemente rica em óxidos de silício, alumínio, ferro, cálcio e magnésio permite considerar diferentes rotas de aproveitamento, como concretos, argamassas, pavimentos, materiais cerâmicos, adsorventes e ligantes ativados alcalinamente. No entanto, o desempenho do resíduo nessas aplicações depende de fatores como granulometria, área superficial, composição química, organização estrutural, presença de carbono residual e disponibilidade de espécies reativas (Aygün; Bilir; Uysal, 2024; Li *et al.*, 2024).

Entre as possibilidades de aproveitamento da cinza pesada, os geopolímeros destacam-se por permitirem a obtenção de materiais ligantes a partir da ativação alcalina de fontes aluminosilicáticas. Nessa aplicação, o resíduo deixa de atuar apenas como material de preenchimento ou agregado e passa a ser avaliado como componente da matriz ligante. Entretanto, sua contribuição depende da disponibilidade de espécies reativas, da composição química, da granulometria e da interação com o meio alcalino, fatores que tornam necessária a avaliação específica de cada resíduo de origem (Mohan Kumar *et al.*, 2025; Siyal *et al.*, 2024).

Nesse contexto, formulações híbridas à base de metacaulim representam uma rota promissora para investigar a incorporação parcial da cinza pesada. O metacaulim atua como precursor aluminosilicático de maior reatividade, enquanto a cinza pesada pode contribuir por efeito físico de preenchimento, ajuste da matriz e, eventualmente, pela participação de espécies silicoaluminosas no processo de ativação. Estudos recentes indicam que baixos teores de CBA podem favorecer o desempenho de matrizes geopoliméricas, embora esse efeito dependa diretamente das características do resíduo, do preparo físico e das condições de formulação adotadas (Bheel *et al.*, 2024; Ghanim *et al.*, 2025; Ju *et al.*, 2023).

Apesar dos avanços reportados na literatura, a viabilidade da cinza pesada em geopolímeros não pode ser generalizada, pois resíduos provenientes de diferentes sistemas de combustão apresentam composições, estruturas e graus de reatividade distintos. Essa limitação é especialmente relevante para materiais da região de Candiota-RS, cuja cadeia carbonífera possui importância regional e gera resíduos minerais ainda pouco explorados em aplicações de maior valor tecnológico. Assim, avaliar a cinza pesada local em matrizes geopoliméricas contribui para a valorização de um resíduo regional e para o desenvolvimento de alternativas ligantes alinhadas aos princípios de sustentabilidade e economia circular.

Diante desse cenário, este Trabalho avalia o potencial de utilização da cinza pesada de Candiota-RS como componente parcial em formulações geopoliméricas à base de metacaulim. A investigação está centrada na relação entre as características químicas, granulométricas e espectroscópicas do resíduo e o desempenho mecânico inicial das matrizes produzidas, buscando verificar se a incorporação de baixos teores de cinza pesada pode contribuir para o aproveitamento tecnológico de resíduos da cadeia carbonífera regional.

2 OBJETIVOS

2.1 Objetivo geral

Avaliar o potencial de utilização da cinza pesada proveniente da combustão de carvão mineral da região de Candiota–RS como componente parcial em formulações geopoliméricas à base de metacaulim, por meio da caracterização química, granulométrica e espectroscópica do resíduo e da análise do desempenho mecânico das matrizes produzidas.

2.2 Objetivos específicos

- a) caracterizar o carvão mineral de partida por meio de análise imediata e determinação do poder calorífico superior, a fim de contextualizar o material associado à geração da cinza pesada;
- b) preparar fisicamente a cinza pesada por secagem, homogeneização e peneiramento, selecionando a fração passante em 0,248 mm para aplicação nas formulações geopoliméricas;
- c) caracterizar a cinza pesada quanto à composição química, distribuição granulométrica e resposta espectroscópica, utilizando fluorescência de raios X, classificação granulométrica por peneiramento e espectroscopia Raman;
- d) produzir formulações geopoliméricas à base de metacaulim com incorporação parcial de cinza pesada nos teores de 5% e 10%, utilizando ativação alcalina com NaOH 10 mol·L⁻¹ e fonte silicatada complementar;
- e) moldar e curar corpos de prova geopoliméricos em condições experimentais definidas, avaliando o efeito da incorporação da cinza pesada sobre a formação e integridade das matrizes produzidas;
- f) determinar o desempenho mecânico inicial das formulações geopoliméricas por meio de ensaio de resistência à compressão aos 7 e 14 dias de cura;
- g) relacionar as características químicas, granulométricas e espectroscópicas da cinza pesada com o comportamento mecânico das formulações obtidas, discutindo seu potencial como componente parcial em ligantes geopoliméricos de menor impacto ambiental.

3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Este capítulo apresenta o referencial teórico que fundamenta a investigação da cinza pesada de Candiota-RS como matéria-prima parcial em formulações geopoliméricas. A discussão inicia-se com aspectos relacionados ao carvão mineral, à geração termelétrica e à formação dos resíduos associados à conversão térmica do combustível, com ênfase na cinza pesada. Em seguida, são abordadas as características físicas, químicas, mineralógicas e ambientais desse resíduo, bem como suas principais rotas de aproveitamento. Por fim, apresentam-se os fundamentos da geopolimerização, os parâmetros de formulação de sistemas ativados alcalinamente e os métodos de caracterização necessários para relacionar as propriedades da cinza ao desempenho dos geopolímeros produzidos.

3.1 Carvão mineral

O carvão mineral é um recurso fóssil de relevância energética e industrial, cuja utilização ainda permanece associada à geração termelétrica em diferentes países. No Brasil, embora sua participação na matriz elétrica seja menor em comparação com fontes renováveis, o carvão mantém importância regional e estratégica, especialmente em áreas carboníferas do sul do país. Sua abordagem nesta revisão é necessária porque as características do carvão influenciam diretamente o comportamento do material durante a combustão e, conseqüentemente, a geração e as propriedades dos resíduos sólidos formados, entre eles a cinza pesada (Dambros, 2023; Nascimento; Soares, 2025).

A valorização de resíduos associados à cadeia do carvão tem sido discutida sob a perspectiva da economia circular, especialmente pela necessidade de reduzir o descarte e ampliar o uso de materiais residuais em aplicações tecnológicas. Estudos indicam que subprodutos dessa cadeia podem ser empregados em materiais de construção, argamassas, asfaltos, zeólitas e geopolímeros, desde que suas propriedades sejam previamente caracterizadas. Para compreender a origem desses subprodutos, torna-se necessário discutir inicialmente a definição, a composição e a classificação do carvão mineral, aspectos que condicionam seu comportamento durante a conversão térmica (Faraco *et al.*, 2025).

3.1.1 Definição e composição do carvão mineral

O carvão mineral é uma rocha sedimentar combustível formada a partir da transformação progressiva de matéria orgânica vegetal acumulada em ambientes deposicionais específicos e submetida, ao longo do tempo geológico, a processos de soterramento, compactação, pressão e temperatura. Esse processo, denominado carbonificação, promove alterações graduais na composição e na estrutura da matéria orgânica original, originando um material carbonoso heterogêneo, cuja qualidade depende do grau de evolução geológica, da composição mineral e das condições de formação do depósito (Oskay, 2025).

Do ponto de vista composicional, o carvão mineral é constituído por uma fração orgânica e por uma fração inorgânica ou mineral. A fração orgânica está associada principalmente ao conteúdo carbonoso e ao potencial energético do combustível, enquanto a fração mineral compreende minerais e elementos inorgânicos que influenciam propriedades como teor de cinzas, poder calorífico, comportamento térmico e formação de resíduos sólidos. Essa fração mineral pode incluir silicatos, aluminossilicatos, carbonatos, sulfetos, óxidos e outros constituintes, cuja presença varia conforme a origem geológica e as condições deposicionais do carvão (Junussov *et al.*, 2026; Premlall; Koech, 2025).

Essa distinção entre fração orgânica e fração mineral é fundamental para o presente Trabalho, pois a cinza pesada não deriva da fração combustível do carvão, mas principalmente da transformação térmica de sua fração inorgânica. Durante a combustão, a matéria orgânica é convertida majoritariamente em gases, enquanto os constituintes minerais podem sofrer decomposição, fusão parcial, aglomeração e posterior resfriamento, originando resíduos sólidos como cinza volante, cinza pesada e escória de caldeira. Estudos recentes sobre cinzas de carvão reforçam que a composição, a heterogeneidade e o histórico térmico do material de origem condicionam diretamente as características dos resíduos formados, aspecto essencial para avaliar seu potencial de reaproveitamento tecnológico (Bennehalli *et al.*, 2025; Nadirov *et al.*, 2025).

3.1.2 Classificação do carvão mineral

A classificação do carvão mineral está diretamente relacionada ao seu *rank*, conceito que expressa o grau de carbonificação ou maturidade da matéria orgânica original ao longo do tempo geológico. Esse grau de evolução influencia propriedades importantes do combustível, como teor de carbono fixo, teor de matérias voláteis, umidade e poder calorífico, sendo, portanto, um critério essencial para avaliar seu comportamento em processos termoquímicos. Essa evolução pode ser representada pela sequência turfa, linhito, sub-betuminoso, betuminoso e antracito, acompanhada pelo aumento do teor de carbono e do poder calorífico, bem como pela redução progressiva da umidade e da matéria volátil, conforme apresentado na Figura 1 (Riasetiawan *et al.*, 2023).

Figura 1 - Representação esquemática da evolução do carvão mineral



Fonte: Autor, produzido com auxílio da inteligência artificial generativa ChatGPT (OpenAI) (2026).

Entre os sistemas de classificação existentes, destaca-se a norma ASTM D388-19a, *Standard Classification of Coals by Rank*, que classifica os carvões segundo seu grau de metamorfismo na série natural que vai de linhito a antracito. Essa norma utiliza propriedades graduais relacionadas ao *rank* e considera, principalmente, o carbono fixo e o poder calorífico superior em base livre de matéria mineral. Para carvões de maior *rank*, a classificação é feita com base no teor de carbono fixo em base seca e

livre de matéria mineral; para carvões de menor *rank*, o enquadramento ocorre principalmente pelo poder calorífico superior em base úmida e livre de matéria mineral (ASTM, 2019). Estudos que aplicam a classificação ASTM reforçam que parâmetros como carbono fixo, matéria volátil, umidade, cinzas e poder calorífico são fundamentais para interpretar o *rank* e a qualidade tecnológica do carvão. Riasetiawan *et al.* (2023), por exemplo, utilizaram dados de análise imediata e poder calorífico para classificar carvões segundo critérios ASTM, demonstrando a importância da padronização das bases de cálculo para evitar interpretações equivocadas. De forma complementar, Hower *et al.* (2022) destacam que a avaliação da qualidade do carvão deve considerar não apenas o poder calorífico, mas também sua composição mineral e suas implicações para o uso energético e para a geração de resíduos.

A classificação do carvão mineral, nesta investigação, não se limita ao interesse energético, pois também auxilia na compreensão da geração e das características da cinza pesada. O *rank*, a composição petrográfica e o teor de matéria mineral constituem propriedades distintas do carvão e devem ser avaliados conjuntamente. Em geral, carvões de menor *rank* apresentam maior umidade e menor poder calorífico, enquanto elevados teores de matéria mineral favorecem maior geração de cinzas durante a combustão. Essa combinação é especialmente relevante para os carvões utilizados nos sistemas termelétricos da região de Candiota-RS, uma vez que a composição do combustível de partida influencia diretamente as características químicas e mineralógicas da cinza pesada gerada e, em conjunto com as condições operacionais da combustão, suas características granulométricas. Assim, a caracterização do carvão fornece uma base importante para relacionar sua qualidade energética, seu conteúdo mineral e a geração de resíduos sólidos durante a combustão (Ade; Araújo; Rodrigues, 2019; Dambros, 2023; Riasetiawan *et al.*, 2023).

3.2 Geração de energia em termelétricas a carvão

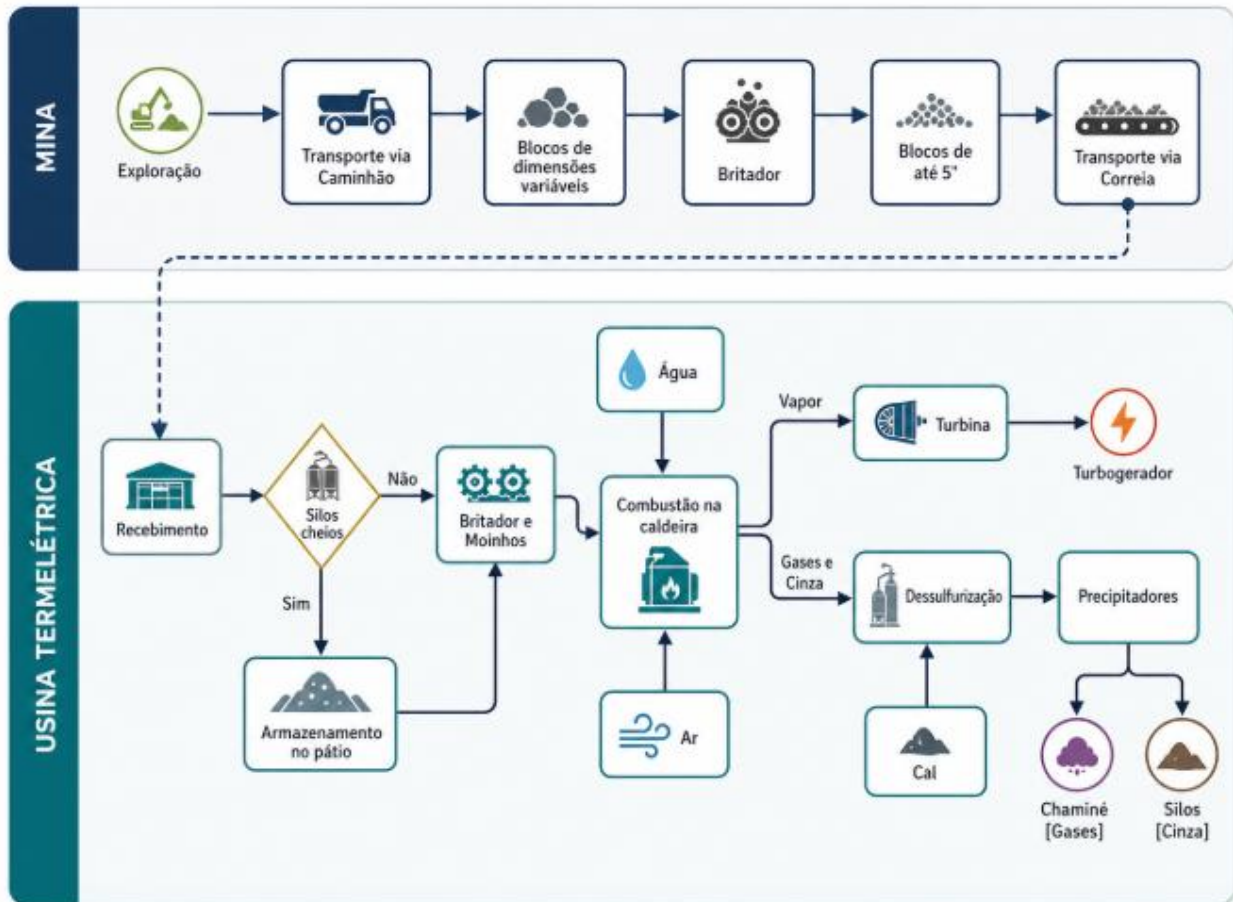
As usinas termelétricas são empreendimentos destinados à geração de energia elétrica a partir da conversão da energia térmica liberada por combustíveis capazes de produzir calor. Esses combustíveis podem incluir carvão mineral, gás natural, óleo combustível, óleo diesel, biomassa e outros recursos energéticos. No sistema elétrico brasileiro, a geração termelétrica exerce papel complementar e estratégico devido à sua capacidade de operação controlável, contribuindo para a segurança do

suprimento em períodos de maior demanda ou de menor disponibilidade de fontes renováveis variáveis. Entretanto, quando baseada em combustíveis fósseis, essa modalidade também está associada à emissão de gases de efeito estufa e à geração de resíduos sólidos, o que reforça a importância de estratégias de controle ambiental e valorização de subprodutos (ANEEL, 2026; Brasil, 2025; EPE, 2025).

Nas usinas termelétricas a carvão mineral, a geração de eletricidade ocorre predominantemente por meio de um ciclo a vapor. Nesse sistema, o carvão é preparado e alimentado na caldeira, onde sua combustão libera energia térmica. O calor gerado é transferido para a água, promovendo sua vaporização em condições elevadas de pressão e temperatura. O vapor produzido é direcionado para uma turbina, na qual sua expansão gera trabalho mecânico rotacional, posteriormente convertido em energia elétrica no gerador. Após a passagem pela turbina, o vapor é condensado e a água retorna ao sistema, fechando o ciclo térmico. Dessa forma, o processo integra as etapas de combustão, geração de vapor, expansão, condensação e conversão eletromecânica da energia (Brasil, 2025; EPE, 2025).

A Figura 2 apresenta, de forma esquemática, as principais etapas envolvidas em uma usina termelétrica a carvão, desde o preparo e a combustão do combustível até a geração de energia elétrica. A representação também destaca as correntes associadas ao tratamento dos gases de combustão e à formação dos resíduos sólidos, como cinza volante, cinza pesada e resíduos vinculados aos sistemas de controle ambiental.

Figura 2 - Esquema simplificado de uma usina termelétrica a carvão



Fonte: Autor, produzido com auxílio da inteligência artificial generativa ChatGPT (OpenAI) (2026).

No município de Candiota, no Rio Grande do Sul, a geração termelétrica a carvão possui relevância histórica, econômica e tecnológica em razão da disponibilidade regional do combustível mineral. Nesse contexto, destaca-se a UTE Candiota III, cuja operação comercial teve início em janeiro de 2011 e que permanece associada ao aproveitamento energético do carvão mineral nacional. A continuidade da usina no planejamento energético brasileiro evidencia a importância regional dessa fonte, ainda que seu uso esteja relacionado a desafios ambientais e à necessidade de controle das emissões atmosféricas e dos resíduos gerados (Alves, 2017; Brasil, 2026).

Além da produção de eletricidade, a operação de uma usina termelétrica a carvão envolve sistemas auxiliares de controle ambiental. No caso da UTE Candiota III, estudos técnicos indicam a adoção de sistema de dessulfurização semisseco com uso de cal virgem, integrado ao controle de material particulado, além de queimadores

de baixa emissão de NOx. Durante a combustão, a fração orgânica do carvão é convertida majoritariamente em gases, enquanto a fração mineral permanece no sistema e origina resíduos sólidos. Na UTE Candiota III, aproximadamente 80% das cinzas geradas correspondem à fração leve, arrastada pelos gases e captada em sistemas de controle, enquanto cerca de 20% correspondem à cinza pesada, que se deposita no fundo da fornalha e é posteriormente removida (Alves, 2017).

Portanto, a geração termelétrica a carvão deve ser compreendida não apenas como um processo de conversão energética, mas também como uma rota contínua de formação de resíduos minerais. Essa relação conduz à necessidade de distinguir as diferentes correntes residuais geradas no processo, uma vez que cada uma apresenta características e possibilidades de aproveitamento distintas.

3.3 Resíduos gerados na conversão termoquímica do carvão

A conversão termoquímica do carvão compreende processos como combustão, pirólise e gaseificação, os quais se diferenciam principalmente pela disponibilidade de agente oxidante, pelas condições operacionais e pelos produtos obtidos. Na pirólise, o aquecimento ocorre na ausência de oxigênio, favorecendo a formação de carvão residual, gases e compostos condensáveis. Na gaseificação, por sua vez, a conversão ocorre em atmosfera redutora, com oferta subestequiométrica de oxidante e, frequentemente, presença de vapor, visando à produção de gás de síntese. Embora essas rotas apresentem finalidades distintas, todas envolvem transformações da fração orgânica e da fração mineral do carvão, podendo gerar resíduos sólidos, líquidos condensáveis e correntes gasosas contaminantes (Ofoe; Yusuf; Ibrahim, 2025).

Entre as rotas de conversão do carvão, a combustão em usinas termelétricas é a mais relevante para esta revisão, pois é nela que se originam os resíduos minerais diretamente associados à geração de energia elétrica. Nesse processo, a fração orgânica do carvão é convertida majoritariamente em gases de combustão, enquanto a fração mineral permanece no sistema e sofre transformações térmicas, como decomposição, fusão parcial, aglomeração e resfriamento. Como resultado, formam-se diferentes resíduos da combustão do carvão, usualmente denominados *coal combustion products* ou *coal combustion residuals*, entre os quais se destacam a cinza volante (*fly ash*), a cinza pesada (*bottom ash*), a escória de caldeira (*boiler slag*)

e os materiais provenientes da dessulfurização dos gases de combustão (Adams, 2024; Petrović; Fiket, 2022).

A cinza volante corresponde à fração mais fina do material mineral, arrastada pelos gases de combustão e posteriormente captada por equipamentos de controle de material particulado, como precipitadores eletrostáticos ou filtros de mangas. A cinza pesada, por outro lado, corresponde à fração mais grosseira, que se deposita no fundo da fornalha ou nas regiões inferiores do sistema de combustão, sendo removida após o processo. Já a escória de caldeira está associada a condições em que parte do material mineral fundido se resfria formando uma fase vitrificada. Essa diferenciação é importante porque cada resíduo apresenta características físicas, químicas e mineralógicas próprias, o que influencia seu manejo, sua disposição e seu potencial de reaproveitamento tecnológico (Adams, 2024; Garcia *et al.*, 2024).

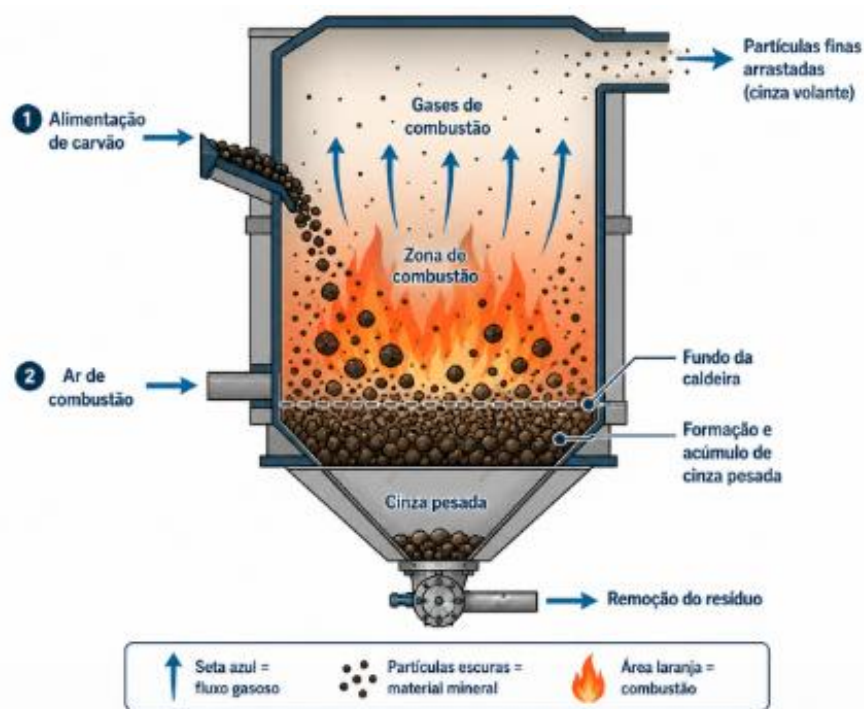
Além das cinzas propriamente ditas, a combustão do carvão também gera gases contendo compostos de enxofre, especialmente SO_2 , exigindo sistemas de controle ambiental. Os processos de dessulfurização dos gases de combustão podem gerar resíduos específicos, geralmente ricos em compostos de cálcio e sulfatos, cuja composição depende do reagente alcalino utilizado e da tecnologia de abatimento adotada. No caso da UTE Candiota III, o sistema de controle de gases de combustão está associado à geração de um resíduo de dessulfurização, cuja composição é marcada pela presença de compostos de cálcio, magnésio e sulfatos, relacionados ao uso de cal no processo. Dessa forma, esse material constitui uma corrente residual distinta da cinza pesada propriamente dita (Alves, 2017; Simões, 2022).

Essa distinção entre os diferentes resíduos é fundamental para evitar generalizações indevidas. Enquanto os materiais de dessulfurização possuem composição fortemente condicionada pelo sistema de abatimento de poluentes, a cinza pesada preserva de maneira mais direta a assinatura mineral do carvão e das transformações térmicas ocorridas durante a combustão. Por isso, a cinza pesada assume posição central entre os resíduos da conversão termoquímica do carvão, pois combina disponibilidade regional, caráter predominantemente mineral e possibilidade de inserção em rotas tecnológicas mais nobres, especialmente em sistemas geopoliméricos (Petrović; Fiket, 2022; Faraco *et al.*, 2025).

3.4 Cinza pesada: formação, características e impactos ambientais

Após a distinção entre os principais resíduos gerados na combustão do carvão, a cinza pesada merece análise específica por reunir duas características centrais: representa uma fração mineral de disposição ambientalmente sensível e, ao mesmo tempo, apresenta composição potencialmente compatível com aplicações tecnológicas. Sua formação decorre das transformações térmicas da matéria mineral do carvão, incluindo decomposição, fusão parcial, aglomeração e resfriamento das partículas mais grosseiras, que se depositam nas regiões inferiores do sistema de combustão (Aygün; Bilir; Uysal, 2024; Irigon, 2021). A Figura 3 apresenta, de forma esquemática, a formação da cinza pesada no fundo da caldeira, destacando sua deposição na região inferior do sistema e o arraste das partículas finas associadas à cinza volante.

Figura 3 - Esquema da formação da cinza pesada no fundo da caldeira



Fonte: Autor, produzido com auxílio da inteligência artificial generativa ChatGPT (OpenAI) (2026).

Fisicamente, a cinza pesada é um material granular e heterogêneo, constituído frequentemente por partículas irregulares, rugosas e porosas. Essa morfologia influencia diretamente propriedades como massa específica, absorção de água,

empacotamento, trabalhabilidade e interação com matrizes cimentícias ou geopoliméricas. Aygün, Bilir e Uysal (2024) destacam que a CBA apresenta elevada variabilidade física, incluindo ampla faixa de massa específica e módulo de finura, além de absorção de água superior à de agregados naturais em muitos casos, aspecto que exige ajustes de formulação quando o material é utilizado em sistemas de construção.

Quimicamente, a cinza pesada apresenta composição frequentemente dominada por óxidos de silício, alumínio e ferro, além de cálcio, magnésio, potássio e outros elementos em menores proporções. Quanto à mineralogia, são comuns fases cristalinas como quartzo, mulita, hematita e magnetita, além de uma fração vítrea ou amorfa aluminosilicática formada durante o resfriamento do material parcialmente fundido. Essa fração amorfa é particularmente importante para aplicações em sistemas ativados alcalinamente, pois tende a apresentar maior suscetibilidade à dissolução em meio alcalino do que as fases cristalinas mais estáveis (Li *et al.*, 2024; Tamanna *et al.*, 2023).

Apesar de seu caráter predominantemente silicoaluminoso, a cinza pesada em estado bruto costuma apresentar menor reatividade que precursores convencionais, como metacaulim e determinadas cinzas volantes. Essa limitação está associada à maior granulometria, à menor área superficial específica, à presença de fases cristalinas pouco reativas, à variabilidade da fração amorfa e à possível presença de carbono não queimado (Hoy *et al.*, 2025; Tamanna *et al.*, 2023).

No contexto brasileiro, a cinza pesada ainda apresenta aproveitamento limitado quando comparada à cinza volante, sendo frequentemente direcionada a áreas de disposição, cavas de mineração ou sistemas de armazenamento associados às usinas. Em Candiota-RS, essa realidade é particularmente relevante devido à presença histórica da geração termelétrica a carvão e à disponibilidade regional de resíduos minerais. Irigon (2021) destaca que a cinza pesada gerada nesse contexto é removida do fundo da caldeira e usualmente disposta juntamente com rejeitos de mina, prática que mantém preocupações ambientais e limita o aproveitamento tecnológico do material.

Os impactos ambientais potenciais da cinza pesada estão relacionados principalmente às condições de disposição e à mobilidade de seus constituintes. Embora a CBA apresente, em geral, partículas mais grosseiras do que a cinza volante, ela pode conter elementos traço e metais cuja liberação para o meio depende de

fatores como pH, intemperismo, composição mineralógica, presença de fases amorfas e condições hidráulicas do local de disposição. Petrović e Fiket (2022) destacam que a avaliação de risco ambiental de resíduos da combustão do carvão não deve se restringir ao teor total de contaminantes, sendo necessário considerar também sua mobilidade, o comportamento de lixiviação e as condições ambientais de exposição.

Portanto, a cinza pesada deve ser interpretada como um resíduo de dupla relevância: ambiental, devido aos riscos associados à disposição inadequada, e tecnológica, devido à sua composição mineral e ao possível aproveitamento em materiais de construção. Entretanto, seu uso em aplicações de maior complexidade exige caracterização prévia, pois propriedades como mineralogia, granulometria, fração vítrea e mobilidade de constituintes condicionam tanto o desempenho técnico quanto a segurança ambiental do material. A partir dessas características, diferentes rotas de aproveitamento têm sido investigadas (Aygün; Bilir; Uysal, 2024; Li *et al.*, 2024).

3.5 Aplicações tecnológicas da cinza pesada

O aproveitamento da cinza pesada tem sido discutido como estratégia para reduzir a disposição de resíduos gerados em usinas termelétricas e ampliar sua inserção em cadeias produtivas com interesse técnico e ambiental. De modo geral, a literatura indica que esse material pode ser empregado em diferentes segmentos da construção civil, incluindo concretos, argamassas, pavimentos, estabilização de solos, produtos cerâmicos, adsorção de poluentes e sistemas ligantes alternativos. Essa diversidade de aplicações decorre do caráter predominantemente silicoaluminoso da cinza pesada, de sua granulometria e de sua possibilidade de atuação tanto como material granular quanto como componente de matrizes cimentícias e geopoliméricas (Aygün; Bilir; Uysal, 2024; Faraco *et al.*, 2025).

A Figura 4 sintetiza as principais aplicações tecnológicas da cinza pesada reportadas na literatura.

Figura 4 - Mapa visual das aplicações tecnológicas da cinza pesada



Fonte: Autor, produzido com auxílio da inteligência artificial generativa ChatGPT (OpenAI) (2026).

Entre as aplicações voltadas à construção civil, destaca-se o uso da cinza pesada como substituto parcial de agregados naturais ou como material complementar em concretos e argamassas. Nessa função, sua contribuição está associada ao efeito de enchimento, ao ajuste granulométrico e à redução do consumo de areia natural. Entretanto, sua elevada variabilidade física e química exige controle prévio para evitar prejuízos à trabalhabilidade, à resistência mecânica e à durabilidade (Alosta *et al.*, 2024; Aygün; Bilir; Uysal, 2024).

Em pavimentação e estabilização de solos, a cinza pesada pode atuar como material granular ou estabilizante, contribuindo para o aproveitamento de grandes volumes de resíduo em camadas de base, sub-base ou subleito. Ainda há estudos que mostram que a incorporação de CBA pode melhorar propriedades geotécnicas, como capacidade de suporte, resistência mecânica e estabilidade de solos, especialmente quando combinada com outros materiais estabilizantes. Kumar *et al.* (2025), por exemplo, avaliaram misturas contendo cinza pesada e fibra de basalto para estabilização de subleito, observando melhorias em propriedades como resistência à compressão simples, resistência à tração indireta e índice de suporte

Califórnia. Em outro contexto, Rochanavibhata *et al.* (2024) investigaram o uso de cinza pesada e cimento em materiais de pavimentação, demonstrando sua possibilidade de aplicação em substituição parcial a materiais lateríticos naturais.

Além das aplicações estruturais e geotécnicas, a cinza pesada também tem sido avaliada na produção de produtos cerâmicos e em processos de adsorção de poluentes. Em materiais cerâmicos, sua composição rica em sílica, alumina e óxidos fundentes pode favorecer sua incorporação parcial em massas cerâmicas, desde que sejam controlados aspectos como granulometria, composição química, retração e absorção de água. Em processos de adsorção, por sua vez, a porosidade, a área superficial e a composição mineral da CBA podem contribuir para a retenção de contaminantes, embora essa aplicação geralmente demande tratamentos físicos ou químicos prévios para aumentar a eficiência do material e reduzir riscos associados à lixiviação de constituintes indesejáveis (Aygün; Bilir; Uysal, 2024; Faraco *et al.*, 2025).

Apesar da relevância dessas rotas, muitas aplicações convencionais exploram a cinza pesada predominantemente como substituto físico de materiais naturais, e não necessariamente como componente quimicamente ativo. Isso significa que, embora seu uso em pavimentos, solos, concretos e cerâmicas seja importante para absorver grandes volumes de resíduo e reduzir impactos ambientais associados à disposição, essas rotas nem sempre aproveitam plenamente a fração aluminossilicática potencialmente reativa do material. Aplicações baseadas apenas em efeito de enchimento ou substituição granulométrica apresentam menor exigência química, mas também exploram de forma mais limitada o potencial reativo do resíduo quando comparadas a sistemas ligantes ativados alcalinamente.

Sob essa perspectiva, os geopolímeros se destacam como rota de maior valor agregado, pois permitem avaliar a cinza pesada não apenas como material de substituição física, mas como componente potencialmente participante da formação da matriz ligante. Nessa abordagem, a cinza pode ser incorporada como precursor parcial em formulações híbridas, geralmente associada a materiais mais reativos, como o metacaulim, ou ainda ser utilizada como fonte de sílica para a produção de ativadores alternativos (Bheel *et al.*, 2024; Ju *et al.*, 2023; Ghanim *et al.*, 2025).

Dessa forma, as aplicações tecnológicas da cinza pesada evidenciam diferentes níveis de aproveitamento do resíduo. Enquanto as rotas geotécnicas e cimentícias convencionais se destacam pela possibilidade de consumo em maior

escala, os sistemas geopoliméricos apresentam maior exigência quanto à reatividade do material e ao controle da formulação.

3.6 Geopolímeros como ligantes alternativos

Entre as rotas mais promissoras para o aproveitamento de resíduos aluminosilicáticos, os geopolímeros se destacam por possibilitarem a formação de materiais ligantes a partir da ativação alcalina de fontes ricas em sílica e alumina. Esses materiais podem ser classificados como polímeros inorgânicos ou ligantes ativados alcalinamente, formados pela reação entre um precursor sólido aluminosilicático e uma solução ativadora alcalina. No contexto da construção civil, os geopolímeros têm sido estudados como alternativa aos ligantes convencionais à base de cimento Portland, especialmente por permitirem a incorporação de resíduos industriais e a redução de impactos associados ao consumo de matérias-primas naturais e à produção de clínquer (Kehinde; Hughes; Amalu, 2024; Siyal *et al.*, 2024).

O interesse nos geopolímeros está relacionado à possibilidade de utilizar a cinza pesada como componente parcial do sistema endurecido. Diferentemente de aplicações em que a cinza atua apenas como agregado ou material de enchimento, a incorporação em sistemas geopoliméricos exige avaliar se o resíduo possui frações reativas capazes de liberar espécies de silício e alumínio em meio alcalino. Assim, o estudo dos geopolímeros fornece a base teórica necessária para interpretar a relação entre composição química, organização mineralógica, fração amorfa, granulometria e desempenho mecânico dos materiais produzidos.

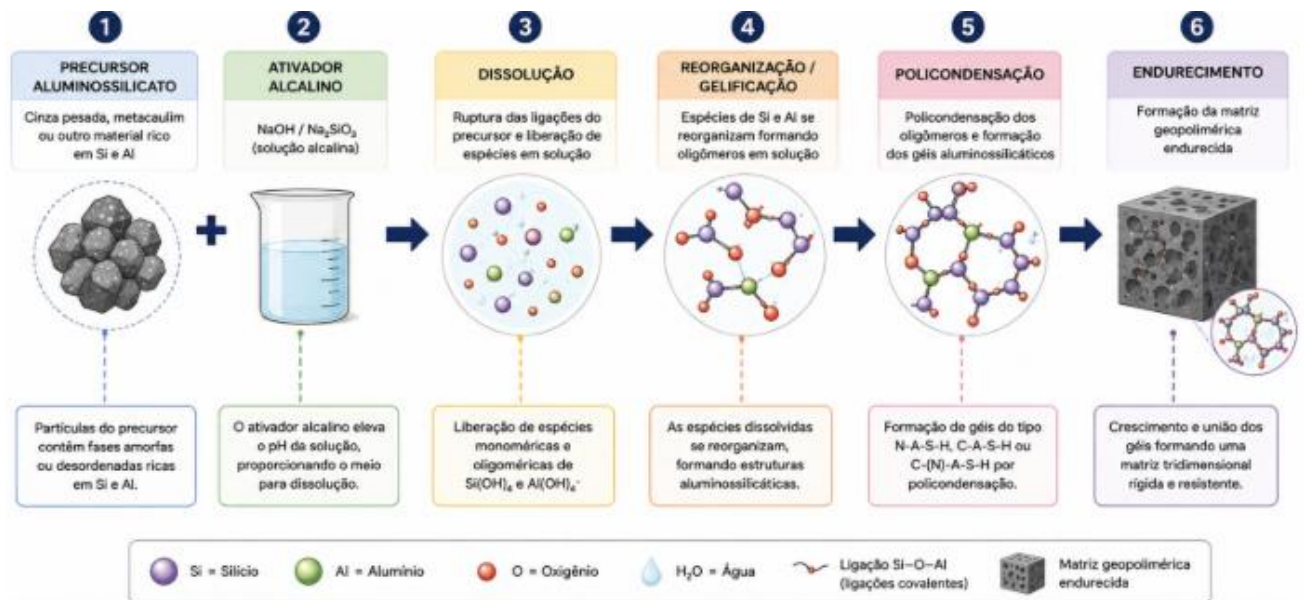
3.6.1 Fundamentos da geopolimerização e mecanismo de formação

A geopolimerização pode ser compreendida como um processo químico complexo, no qual precursores aluminosilicáticos reagem em meio fortemente alcalino, promovendo a formação de uma rede tridimensional de aluminossilicatos. O processo envolve etapas simultâneas ou parcialmente sobrepostas de dissolução das fases reativas, liberação de espécies de silício e alumínio, formação de oligômeros, gelificação, condensação e endurecimento da matriz. Dessa forma, a geopolimerização não deve ser interpretada como uma reação única e instantânea, mas como um processo evolutivo dependente da composição do precursor, da

alcalinidade do meio, da disponibilidade de sílica solúvel, da relação líquido/sólido e das condições de cura (Chuewangkam; Kidkhunthod; Pinitsoontorn, 2024; Siyal *et al.*, 2024).

A Figura 5 apresenta, de forma esquemática, as principais etapas envolvidas no mecanismo de geopolimerização, desde o contato entre o precursor aluminossilicático e o ativador alcalino até a dissolução das espécies reativas, sua reorganização em solução, a policondensação e a formação da matriz geopolimérica endurecida.

Figura 5 - Representação esquemática do mecanismo de geopolimerização



Fonte: Autor, produzido com auxílio da inteligência artificial generativa ChatGPT (OpenAI) (2026).

Na etapa inicial, o ativador alcalino promove o ataque às fases mais reativas do precursor, favorecendo a dissolução parcial de espécies de Si e Al. Em seguida, essas espécies dissolvidas se reorganizam no meio reacional e passam por reações de condensação, formando ligações Si-O-Al e Si-O-Si que contribuem para o desenvolvimento da estrutura tridimensional do gel. Estudos reforçam que a cinética da geopolimerização é controlada pela disponibilidade de fases amorfas ou desordenadas, pela granulometria do precursor, pela concentração do ativador e pela temperatura de cura, fatores que afetam diretamente a microestrutura e o desempenho final do material (Chuewangkam; Kidkhunthod; Pinitsoontorn, 2024; Mohan Kumar *et al.*, 2025).

A natureza do gel formado depende fortemente da composição química do precursor. Em sistemas com menor teor de cálcio, como aqueles baseados predominantemente em metacaulim ou cinzas ricas em aluminossilicatos, a matriz endurecida costuma estar associada à formação de gel do tipo N-A-S-H, ou sódio-alumino-silicato-hidratado. Em sistemas com maior teor de cálcio, pode ocorrer a formação ou coexistência de géis do tipo C-A-S-H ou C-(N)-A-S-H. Essa diferença é relevante porque a presença de cálcio pode alterar a cinética de reação, a densificação da microestrutura, o tempo de endurecimento e o desenvolvimento de resistência mecânica (Jalal; Srivastava; Tiwari, 2025; Mohan Kumar *et al.*, 2025).

Esse aspecto é especialmente relevante para a cinza pesada, pois sua aplicação como precursor parcial depende da presença de fases efetivamente acessíveis ao meio alcalino. Embora esse resíduo apresente composição frequentemente rica em SiO_2 e Al_2O_3 , parte significativa desses óxidos pode estar associada a fases cristalinas pouco reativas, como quartzo e mulita, reduzindo sua contribuição direta para a formação do gel. Por esse motivo, a formulação do sistema deve considerar não apenas a composição global do resíduo, mas também sua reatividade, sua granulometria e sua compatibilidade com os demais componentes da mistura (Tamanna *et al.*, 2023; Li *et al.*, 2024).

3.6.2 Matérias-primas e parâmetros de formulação

A produção de geopolímeros depende da combinação adequada entre precursor aluminossilicático, ativador alcalino e condições de mistura e cura. O precursor fornece as espécies de silício e alumínio necessárias à formação da rede ligante, enquanto o ativador promove a dissolução das fases reativas e favorece a reorganização estrutural que conduz ao endurecimento do sistema. Por esse motivo, o desempenho do geopolímero não depende de uma composição universal, mas da compatibilidade entre a natureza química e mineralógica do precursor, a composição do ativador, a relação líquido/sólido e o regime de cura adotado (Jiang *et al.*, 2024; Mohan Kumar *et al.*, 2025).

Entre os precursores aluminossilicáticos mais utilizados, o metacaulim ocupa posição de destaque por apresentar composição relativamente controlada, elevada reatividade e menor interferência de impurezas quando comparado a muitos resíduos industriais. Essa característica torna o metacaulim um material adequado para

estudos de referência e para formulações híbridas, nas quais resíduos de menor reatividade são incorporados de forma parcial. Em sistemas baseados em metacaulim, a otimização da matriz geopolimérica depende do ajuste entre o tipo de silicato alcalino, o teor de água e as condições de processamento, parâmetros que influenciam diretamente a densificação da matriz e o desenvolvimento das propriedades mecânicas (Sa Ribeiro *et al.*, 2025).

O ativador alcalino também exerce papel decisivo na formulação, pois controla a dissolução inicial do precursor e a disponibilidade de espécies solúveis para a formação do gel. Os sistemas mais empregados utilizam hidróxido de sódio, silicato de sódio ou a combinação entre ambos. O NaOH contribui para elevar a alcalinidade do meio e favorecer a dissolução das fases reativas, enquanto o silicato de sódio fornece sílica solúvel adicional, importante para as reações de policondensação e para o desenvolvimento de uma matriz mais coesa. Huang e Wang (2024) demonstraram que a composição do ativador alcalino, a relação líquido/sólido e a condição de cura influenciam simultaneamente a trabalhabilidade, a porosidade, a resistência à compressão e o desempenho final de geopolímeros à base de metacaulim.

Além da escolha do precursor e do ativador, parâmetros como razão Si/Al, relação ativador/precursor, relação líquido/sólido, concentração molar do NaOH, teor de substituição e temperatura de cura devem ser considerados de forma integrada. Esses fatores controlam a dissolução das fases reativas, a trabalhabilidade, a porosidade, a velocidade de endurecimento e o desenvolvimento microestrutural, podendo alterar significativamente a resistência mecânica, a estabilidade dimensional e a durabilidade do material (Huang; Wang, 2024; Siyal *et al.*, 2024).

No caso da cinza pesada, essa discussão se torna ainda mais importante, pois esse resíduo geralmente apresenta menor reatividade do que precursores convencionais. Sua maior granulometria, menor área superficial específica, presença de fases cristalinas pouco reativas e variabilidade da fração amorfa podem limitar a dissolução de espécies de Si e Al em meio alcalino. Por isso, a cinza pesada tende a ser incorporada com maior segurança em formulações híbridas, nas quais um precursor mais reativo, como o metacaulim, atua como base da matriz ligante, enquanto a cinza é avaliada como substituto parcial ou componente complementar (Bheel *et al.*, 2024; Li *et al.*, 2024).

Essa estratégia permite avaliar a cinza pesada de forma mais criteriosa, evitando tratá-la como substituto direto e integral de um precursor altamente reativo.

Em formulações híbridas, o metacaulim contribui para garantir maior disponibilidade de espécies reativas e maior previsibilidade na formação do gel, enquanto a cinza pesada pode atuar por efeito físico de empacotamento, pela participação parcial de fases desordenadas ou pela disponibilização complementar de sílica e alumina (Bheel *et al.*, 2024; Li *et al.*, 2024). Dessa forma, o desempenho final do geopolímero depende da interação entre os materiais e não apenas da composição isolada de cada precursor.

A escolha de uma formulação baseada em metacaulim e substituição parcial por cinza pesada é coerente com as limitações reativas esperadas para esse resíduo. A adoção de ativação alcalina com NaOH e fonte silicatada complementar busca fornecer condições químicas adequadas para favorecer a dissolução das frações mais reativas e a formação da matriz geopolimérica. Essa lógica de formulação permite discutir, de forma mais específica, como a cinza pesada tem sido incorporada em sistemas geopoliméricos e quais estratégias vêm sendo propostas para contornar sua menor reatividade (Ghanim *et al.*, 2025; Ju *et al.*, 2023).

3.6.3 Incorporação da cinza pesada em geopolímeros

Nos sistemas geopoliméricos, a cinza pesada deixa de ser avaliada apenas como material granular ou substituto físico e passa a ser considerada um possível componente da matriz ligante. Essa mudança de função torna sua aplicação mais complexa, pois exige composição e reatividade compatíveis com a ativação alcalina. Por isso, seu uso tem sido investigado como alternativa para associar a valorização de resíduos industriais à produção de ligantes alternativos potencialmente menos dependentes de cimento Portland (El Alouani *et al.*, 2024; Mohan Kumar *et al.*, 2025).

Apesar desse potencial, a literatura indica que a cinza pesada não deve ser tratada como precursor universalmente reativo. Sua maior granulometria, menor área superficial específica, presença de fases cristalinas pouco solúveis e variabilidade da fração amorfa tendem a limitar a dissolução de espécies de silício e alumínio em meio alcalino. Essa limitação explica por que a incorporação direta da CBA em geopolímeros pode reduzir a resistência mecânica quando comparada a formulações baseadas em precursores mais reativos, como metacaulim, escória granulada de alto-forno ou determinadas cinzas volantes (Tamanna *et al.*, 2023; Li *et al.*, 2024).

Diante dessas limitações, estudos indicam que a incorporação da cinza pesada tende a ser mais eficiente quando realizada em formulações híbridas, nas quais o resíduo é combinado com precursores de maior reatividade ou submetido a estratégias de beneficiamento. Bheel *et al.* (2024) avaliaram concreto geopolimérico autoadensável baseado em escória granulada de alto-forno, com substituição parcial por cinza pesada e metacaulim, observando que o uso combinado desses materiais reduziu a trabalhabilidade, mas melhorou propriedades mecânicas em teores adequados, com destaque para a mistura contendo 5% de CBA e 5% de metacaulim. Esse resultado reforça que a cinza pesada pode contribuir para o desempenho do sistema quando sua incorporação é limitada e formulada de maneira compatível com os demais precursores.

Outra estratégia relevante consiste em utilizar a cinza pesada não apenas como precursor sólido, mas também como fonte de sílica para a produção de ativadores alternativos. Ju *et al.* (2023) propuseram o uso da CBA para obtenção de solução de silicato de sódio aplicada em geopolímeros à base de metacaulim, destacando que a mistura convencional da cinza como precursor pode degradar a resistência à compressão devido à sua baixa reatividade. Para contornar essa limitação, os autores trataram a CBA com solução alcalina antes da incorporação ao sistema, buscando ampliar o teor aproveitável do resíduo e reduzir a carga ambiental associada ao uso de silicato de sódio comercial.

De forma complementar, Ghanim *et al.* (2025) investigaram a produção de silicato de sódio alternativo a partir de cinza pesada contendo 43,7% de SiO_2 , utilizando processo hidrotermal com soluções de NaOH em diferentes molaridades. Os autores demonstraram o potencial da CBA como fonte alternativa de silicato para sistemas geopoliméricos, reforçando que esse resíduo pode assumir função dupla: atuar como material aluminosilicático e, em determinadas condições de processamento, como fonte de sílica solúvel para a ativação alcalina. Essa abordagem é relevante porque associa a valorização de um resíduo da combustão do carvão à possibilidade de reduzir a dependência de fontes comerciais de silicato de sódio, insumo amplamente empregado em formulações geopoliméricas.

Esses estudos evidenciam que a viabilidade da cinza pesada em geopolímeros não pode ser generalizada. O desempenho obtido depende da origem do resíduo, da composição química, da fração amorfa ou vítrea, da presença de fases cristalinas, da granulometria, do tratamento prévio e da formulação adotada. Portanto, a avaliação

do resíduo deve considerar não apenas sua composição global, mas também a disponibilidade estrutural das espécies reativas em meio alcalino (Bheel *et al.*, 2024; Ju *et al.*, 2023; Ghanim *et al.*, 2025).

No caso da cinza pesada de Candiota-RS, essa discussão é especialmente relevante, pois resíduos de diferentes sistemas de combustão podem apresentar comportamentos distintos frente à ativação alcalina. Essa lacuna reforça a necessidade de avaliar a cinza pesada de Candiota-RS por meio de uma abordagem integrada, capaz de relacionar a natureza do resíduo ao desempenho mecânico das formulações produzidas.

3.7 Métodos de caracterização aplicados ao estudo

A seleção dos métodos de caracterização foi organizada de acordo com as perguntas centrais da investigação. A caracterização do carvão de partida permite contextualizar a origem mineral do resíduo; a caracterização da cinza pesada permite avaliar sua composição, mineralogia, estrutura e granulometria; e o ensaio de resistência à compressão permite verificar o desempenho mecânico das formulações geopoliméricas produzidas. Dessa maneira, as técnicas discutidas a seguir não são tratadas como procedimentos isolados, mas como ferramentas complementares para interpretar a relação entre o material de origem, o resíduo gerado e o comportamento dos geopolímeros obtidos (El Alouani *et al.*, 2024; Ferreira *et al.*, 2025).

3.7.1 Caracterização do carvão de partida

Embora a valorização da cinza pesada seja o foco da investigação, o carvão mineral de partida precisa ser considerado porque representa a origem da fração inorgânica que dará origem aos resíduos sólidos. Parâmetros como teor de umidade, materiais voláteis, cinzas, carbono fixo e poder calorífico auxiliam na compreensão da qualidade tecnológica do combustível, de sua tendência à geração de resíduos e de sua relação com a composição da cinza formada (Dambros, 2023; ASTM, 2021).

A análise imediata é uma das metodologias mais empregadas na caracterização de carvões, pois permite determinar os teores de umidade, materiais voláteis e cinzas, além de calcular o carbono fixo por diferença. Esses parâmetros fornecem uma estimativa da fração combustível e da fração mineral do carvão, sendo

úteis para avaliar seu comportamento em processos termoquímicos. Segundo a ASTM D3172-13(2021)e1, a análise imediata permite estabelecer a relação entre constituintes combustíveis e incombustíveis, além de fornecer subsídios para classificação, avaliação de beneficiamento e interpretação tecnológica do carvão (ASTM, 2021).

A umidade influencia diretamente o desempenho energético, uma vez que parte da energia liberada na combustão é consumida na evaporação da água presente no combustível. O teor de materiais voláteis está relacionado à facilidade de liberação de compostos gasosos durante o aquecimento e interfere na ignição e na reatividade do carvão. Já o teor de cinzas representa a fração mineral residual após a combustão, sendo particularmente relevante para este Trabalho, pois está diretamente associado à quantidade de resíduo sólido gerado. O carbono fixo, por sua vez, corresponde à fração carbonosa remanescente após a remoção da umidade, dos voláteis e das cinzas, sendo um parâmetro importante para avaliar o potencial energético do material.

Além da análise imediata, a determinação do poder calorífico superior constitui parâmetro essencial na avaliação energética do carvão. O PCS expressa a quantidade total de energia liberada durante a combustão completa do combustível, considerando a condensação da água formada no processo. A norma ASTM D5865/D5865M-19 descreve a determinação do poder calorífico superior de carvão e coque por calorimetria de combustão em bomba calorimétrica, sendo esse resultado também relevante para apoiar a classificação do carvão segundo critérios de rank (ASTM, 2019).

Em conjunto, os resultados de análise imediata e poder calorífico permitem relacionar a qualidade do carvão de partida com sua tendência de geração de cinzas. Para carvões com maior teor de matéria mineral e menor poder calorífico, espera-se maior produção relativa de resíduos sólidos após a combustão. Assim, a caracterização do carvão não constitui o objetivo principal do Trabalho, mas fornece uma base complementar para interpretar a origem da cinza pesada e compreender sua relação com o contexto carbonífero de Candiota-RS.

3.7.2 Caracterização da cinza pesada

Para avaliar a cinza pesada como matéria-prima parcial em formulações geopoliméricas, é necessário compreender de forma integrada sua composição química, sua organização estrutural e sua distribuição granulométrica. Em sistemas ativados alcalinamente, a presença de óxidos como SiO_2 e Al_2O_3 é um indicativo importante do potencial aluminossilicático do material; entretanto, a simples ocorrência desses constituintes não garante sua efetiva participação nas reações de geopolimerização. A reatividade da cinza depende também da forma como essas espécies estão organizadas, da presença de estruturas mais ou menos ordenadas, da granulometria e da área de contato disponível para interação com o ativador alcalino.

Nesse contexto, a fluorescência de raios X (FRX), a espectroscopia Raman e a análise granulométrica podem ser empregadas de forma complementar para a avaliação da cinza pesada. A FRX fornece a composição química global do resíduo, normalmente expressa na forma de óxidos, permitindo identificar os principais constituintes presentes, como SiO_2 , Al_2O_3 , Fe_2O_3 , CaO , MgO , K_2O , SO_3 e outros componentes minoritários. Essa informação é essencial para verificar o caráter silicoaluminoso da cinza e sua compatibilidade preliminar com sistemas geopoliméricos, além de permitir a avaliação de óxidos que podem influenciar a formação da matriz ligante, como cálcio, ferro, magnésio e sulfatos (Ferreira *et al.*, 2025; Mohan Kumar *et al.*, 2025).

A espectroscopia Raman, por sua vez, contribui para a investigação estrutural do material, permitindo observar bandas associadas a diferentes ligações químicas e graus de organização presentes na cinza. Em resíduos de combustão do carvão, essa técnica pode auxiliar na identificação de estruturas silicatadas, aluminossilicáticas, óxidos metálicos e possíveis sinais relacionados a carbono residual. Bandas mais estreitas tendem a estar associadas a estruturas mais ordenadas, enquanto bandas largas podem indicar maior desordem estrutural ou presença de fases vítreas. Dessa forma, embora a Raman não substitua integralmente uma análise mineralógica por difração de raios X, ela fornece informações importantes sobre a organização estrutural da cinza e pode auxiliar na interpretação de sua possível reatividade em meio alcalino (Lv *et al.*, 2025; Witte; Garg, 2024).

A análise granulométrica também é fundamental, pois o tamanho das partículas influencia diretamente a área de contato entre a cinza e a solução ativadora, a homogeneidade da mistura, o empacotamento das partículas e a trabalhabilidade das pastas geopoliméricas. De modo geral, partículas mais finas tendem a apresentar maior área superficial específica, o que pode favorecer a interação com o meio alcalino e a dissolução parcial de espécies reativas. Por outro lado, partículas mais grosseiras podem atuar predominantemente como material de preenchimento, contribuindo principalmente por efeito físico na matriz. Assim, a distribuição granulométrica permite avaliar se a cinza pesada apresenta comportamento mais próximo de precursor parcial, componente complementar ou material de enchimento em formulações geopoliméricas (Aygün; Bilir; Uysal, 2024; Hoy *et al.*, 2025).

Dessa forma, a caracterização da cinza pesada deve ser interpretada de maneira integrada. A FRX permite avaliar a composição química global e o potencial aluminosilicático do resíduo; a espectroscopia Raman contribui para a análise estrutural e para a identificação de características associadas à organização das espécies presentes; e a granulometria auxilia na compreensão do comportamento físico da cinza durante a mistura e a ativação alcalina. Embora a ausência de difração de raios X limite a identificação direta das fases cristalinas presentes, a combinação dessas técnicas fornece subsídios relevantes para discutir a compatibilidade da cinza pesada com matrizes geopoliméricas à base de metacaulim e sua possível atuação como componente parcial na formulação.

3.7.3 Avaliação mecânica dos geopolímeros

A resistência à compressão constitui um dos principais parâmetros empregados na avaliação do desempenho mecânico de matrizes geopoliméricas. Por meio desse ensaio, é possível verificar se a incorporação parcial da cinza pesada resulta em materiais endurecidos capazes de suportar carregamentos compressivos, fornecendo uma resposta inicial sobre o efeito do resíduo na formação e no comportamento da matriz ligante.

Em sistemas geopoliméricos, o desenvolvimento da resistência à compressão é influenciado conjuntamente pela composição e pela reatividade dos precursores, pela concentração do ativador alcalino, pela relação líquido/sólido e pelas condições de moldagem e cura. Embora o ensaio não permita identificar diretamente os produtos

de reação formados, seus resultados fornecem uma medida comparativa do grau de consolidação da matriz e das alterações provocadas pela incorporação de materiais residuais (Hossain; Hossain, 2025; Mohan Kumar et al., 2025).

A avaliação mecânica de materiais geopoliméricos pode tomar como referência procedimentos normativos desenvolvidos para materiais cimentícios, desde que sejam explicitadas as adaptações relacionadas à natureza do material, à geometria dos corpos de prova e às condições experimentais adotadas. Para corpos de prova cilíndricos, a ABNT NBR 5739:2018 e a ASTM C39/C39M-24 apresentam princípios gerais referentes ao posicionamento da amostra, à aplicação axial da carga e ao cálculo da resistência à compressão. Entretanto, como essas normas são direcionadas a corpos de prova de concreto, sua utilização em matrizes geopoliméricas de dimensões reduzidas deve ser entendida como referência metodológica, e não como atendimento integral aos procedimentos normativos.

Neste Trabalho, a resistência à compressão foi utilizada para comparar a formulação de referência, produzida à base de metacaulim, com as formulações contendo incorporação parcial de cinza pesada. Essa comparação permitiu avaliar se a presença do resíduo alterou o desempenho mecânico inicial das matrizes e relacionar os resultados obtidos às características químicas, granulométricas e espectroscópicas da cinza pesada.

Dessa forma, a caracterização do carvão mineral, da cinza pesada e das matrizes geopoliméricas constitui um conjunto de etapas complementares para avaliar o potencial técnico do resíduo de Candiota-RS como componente parcial em ligantes ativados alcalinamente.

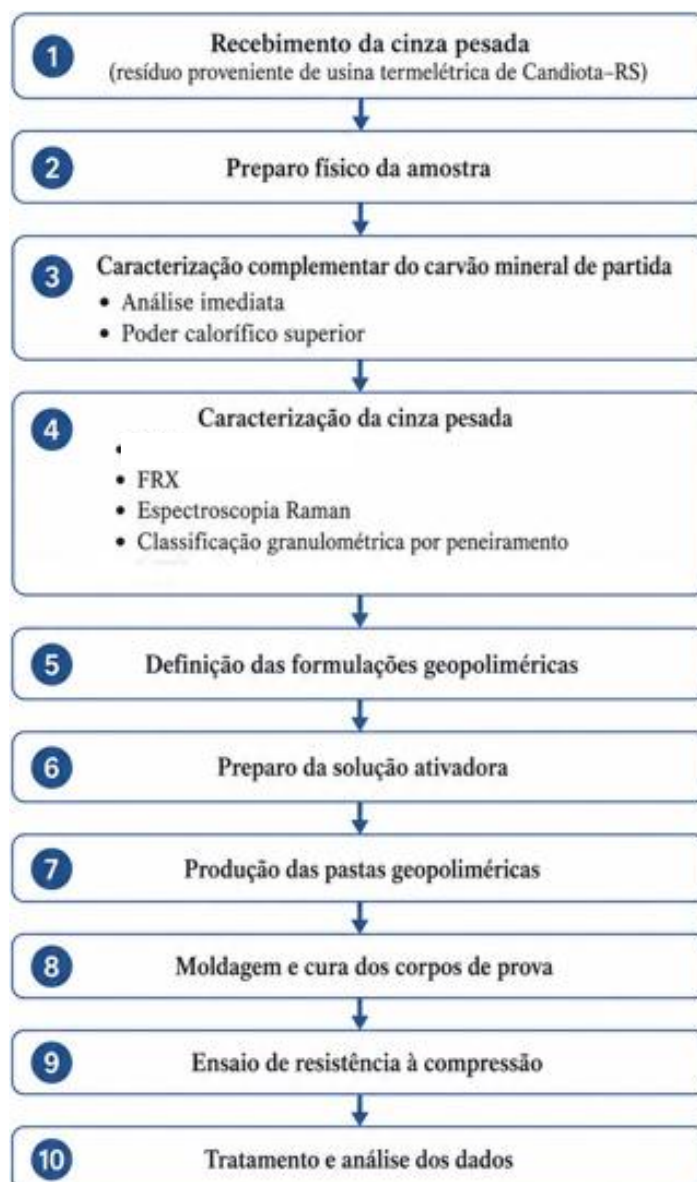
4 METODOLOGIA

Este capítulo descreve os procedimentos experimentais adotados para avaliar a cinza pesada de Candiota-RS como componente parcial em formulações geopoliméricas à base de metacaulim. A metodologia compreende a caracterização complementar do carvão mineral de partida, o preparo físico da cinza pesada, a caracterização química, estrutural e granulométrica do resíduo, o planejamento das formulações, a produção das pastas geopoliméricas, a moldagem e cura dos corpos de prova e a avaliação da resistência à compressão.

A sequência experimental foi organizada de modo a relacionar a composição química, a condição estrutural e a granulometria da cinza pesada com o desempenho mecânico das matrizes geopoliméricas produzidas. A rota de produção adotada foi orientada por estudos prévios envolvendo a incorporação de cinza pesada em sistemas ativados alcalinamente, com destaque para a estratégia de formulação em matriz de metacaulim proposta por Ju *et al.* (2023), com adaptações às matérias-primas e às condições experimentais disponíveis neste Trabalho.

A Figura 6 apresenta o fluxograma geral das etapas metodológicas adotadas neste estudo, contemplando desde a caracterização complementar do carvão mineral de partida até a avaliação mecânica dos geopolímeros produzidos. Essa organização permite visualizar a sequência experimental aplicada e evidencia a relação entre o preparo do resíduo, sua caracterização e sua incorporação nas formulações geopoliméricas.

Figura 6 - Fluxograma geral das etapas metodológicas



Fonte: Autor, produzido com auxílio da inteligência artificial generativa ChatGPT (OpenAI) (2026).

4.1 Planejamento metodológico

O planejamento metodológico foi estruturado para permitir a análise integrada entre a origem do resíduo, suas características químicas, estruturais e granulométricas, e seu efeito no desempenho mecânico de matrizes geopoliméricas à base de metacaulim. Para isso, o carvão mineral de partida foi caracterizado de forma complementar, uma vez que representa a origem da fração inorgânica responsável pela formação da cinza pesada durante o processo de combustão.

Em seguida, a cinza pesada foi submetida às etapas de preparo físico, secagem, homogeneização e padronização granulométrica, com o objetivo de reduzir a heterogeneidade do resíduo e selecionar uma fração mais adequada para incorporação nas formulações geopoliméricas. Após essa etapa, o material foi caracterizado por Fluorescência de Raios X (FRX), espectroscopia Raman e classificação granulométrica por peneiramento. A FRX foi empregada para determinar a composição química global da cinza pesada, expressa principalmente na forma de óxidos; a espectroscopia Raman foi utilizada como técnica complementar para avaliar aspectos estruturais associados à organização das espécies presentes; e a classificação granulométrica permitiu verificar a distribuição de tamanho das partículas utilizadas nas misturas.

Após a caracterização da cinza pesada, foram planejadas três formulações geopoliméricas: uma formulação de referência, sem incorporação de cinza pesada; uma formulação contendo 5% de cinza pesada; e uma formulação contendo 10% de cinza pesada. Essa variação foi adotada para avaliar o efeito do aumento do teor de resíduo sobre o comportamento das matrizes geopoliméricas, mantendo-se constantes os principais parâmetros de síntese, como a relação molar Si/Al, a relação água/sólidos e a concentração da solução alcalina de NaOH.

As formulações foram preparadas utilizando metacaulim como precursor aluminosilicático principal, cinza pesada como componente incorporado à fase sólida e fonte silicatada complementar obtida a partir da evaporação da solução comercial Sicol 30. A ativação alcalina foi realizada com solução de hidróxido de sódio, tomando como referência a lógica experimental proposta por Ju *et al.* (2023), com adaptações às matérias-primas e às condições disponíveis neste Trabalho.

As pastas geopoliméricas foram produzidas pelo método de mistura a seco, moldadas em corpos de prova cilíndricos e mantidas em condição ambiente de laboratório até as idades de cura estabelecidas. Para acompanhar o desenvolvimento mecânico inicial, os corpos de prova foram avaliados aos 7 e 14 dias. Dessa forma, o planejamento experimental permite comparar o comportamento da matriz de referência com as formulações contendo 5% e 10% de cinza pesada, considerando tanto o efeito do teor de resíduo incorporado quanto o avanço inicial do tempo de cura.

Por fim, os corpos de prova foram avaliados por ensaio de resistência à compressão. Os resultados obtidos serão analisados de forma comparativa e exploratória, buscando relacionar a composição química, a condição estrutural e a

granulometria da cinza pesada com o desempenho mecânico das formulações produzidas. Assim, o planejamento metodológico adotado possibilita verificar a viabilidade inicial da cinza pesada de Candiota-RS como componente parcial em ligantes geopoliméricos ativados alcalinamente.

4.2 Matérias-primas e reagentes

As matérias-primas e os reagentes empregados neste estudo foram selecionados de acordo com a proposta de avaliar a incorporação da cinza pesada em formulações geopoliméricas à base de metacaulim. Foram utilizados carvão mineral de partida, cinza pesada proveniente da geração termelétrica a carvão na região de Candiota-RS, metacaulim comercial, hidróxido de sódio, fonte silicatada complementar e água destilada.

O carvão mineral foi considerado como material de origem associado à formação da cinza pesada. Embora não tenha sido empregado diretamente na produção dos geopolímeros, sua caracterização complementar foi realizada para contextualizar o combustível relacionado ao processo termelétrico e fornecer informações sobre sua composição imediata e seu potencial energético.

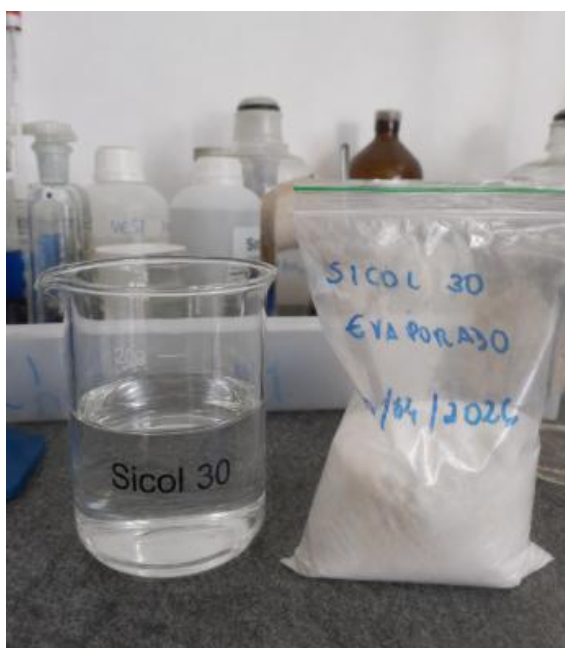
A cinza pesada foi utilizada como componente incorporado às formulações geopoliméricas. O material foi recebido em condição residual e posteriormente submetido às etapas de preparo físico, secagem, homogeneização e classificação granulométrica descritas nos itens subsequentes. Sua incorporação teve como finalidade avaliar o potencial de aproveitamento do resíduo em sistemas ativados alcalinamente à base de metacaulim.

Como precursor aluminossilicático principal, utilizou-se metacaulim comercial HP Ultra, fabricado pela empresa Metacaulim do Brasil. Esse material foi adotado como base das formulações em razão de sua composição rica em sílica e alumina, de sua maior reatividade em meio alcalino e de sua ampla utilização em estudos envolvendo ligantes geopoliméricos. O metacaulim foi utilizado conforme recebido e mantido em recipiente seco e fechado até o preparo das misturas.

O hidróxido de sódio (NaOH) foi utilizado como agente alcalino responsável pela ativação do sistema geopolimérico. A solução alcalina foi preparada utilizando NaOH sólido e água destilada, conforme as proporções definidas no planejamento das formulações.

A fonte silicatada complementar foi obtida a partir da evaporação da solução comercial Sicol 30, apresentada na Figura 7. Esse material foi empregado com a finalidade de ajustar a disponibilidade de sílica nas formulações e auxiliar na obtenção da relação molar Si/Al definida para o sistema geopolimérico.

Figura 7 - Solução comercial Sicol 30 e material silicatado sólido



Fonte: Autor, produzido com auxílio da inteligência artificial generativa ChatGPT (OpenAI) (2026).

A água destilada foi utilizada no preparo das soluções alcalinas e no ajuste da relação água/sólidos adotada nas formulações. Todos os materiais foram armazenados em recipientes adequados, mantidos fechados e identificados até o momento de uso, a fim de reduzir contaminações, absorção de umidade e perdas de material durante as etapas experimentais.

4.2.1 Preparo da fonte silicatada a partir da solução Sicol 30

A solução comercial Sicol 30 (lote 707300415), foi previamente submetida à evaporação da fase líquida para obtenção de uma fonte silicatada sólida, posteriormente empregada nas formulações geopoliméricas. Esse procedimento foi adotado em razão da rota de mistura a seco utilizada neste Trabalho, na qual os constituintes sólidos são inicialmente homogeneizados antes da incorporação da solução ativadora alcalina.

Para o preparo da fonte silicatada, alíquotas de 200 mL da solução Sicol 30 foram transferidas para bquer de vidro e submetidas à evaporação indireta em sistema tipo banho-maria. O aquecimento foi realizado em agitador magnético com aquecimento, marca Lucadema, modelo não identificado. A temperatura média de operação foi mantida em aproximadamente 85 °C, e o tempo necessário para a evaporação da fase líquida de cada alíquota foi de cerca de 5 h. O uso do banho-maria teve como finalidade promover aquecimento mais uniforme e reduzir o risco de superaquecimento localizado durante a concentração da solução silicatada.

O procedimento experimental utilizado para a evaporação da solução comercial Sicol 30 é apresentado na Figura 8. Observa-se o sistema empregado para o aquecimento indireto da solução em banho-maria, para a concentração do material silicatado.

Figura 8 - Preparo da fonte silicatada sólida a partir da solução de Sicol 30



Fonte: Autor (2026).

Após a evaporação, o material sólido obtido foi resfriado à temperatura ambiente, removido do recipiente, homogeneizado e armazenado em recipiente fechado até sua utilização nas formulações geopoliméricas. Considerando o processamento total de 1 L da solução comercial Sicol 30, obteve-se rendimento final de aproximadamente 348 g de material silicatado sólido, correspondente a $348 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$

de solução. Esse material foi empregado como fonte complementar de sílica para o ajuste da relação molar Si/Al das formulações geopoliméricas.

4.3 Caracterização complementar do carvão mineral de partida

A caracterização complementar do carvão mineral de partida foi realizada para contextualizar o combustível associado à geração da cinza pesada utilizada neste estudo. Embora o carvão não tenha sido empregado diretamente na produção dos geopolímeros, sua avaliação fornece informações relevantes sobre a fração combustível, a fração mineral e o potencial energético do material submetido à combustão.

Nesta etapa, foram consideradas duas análises principais: a análise imediata e a determinação do poder calorífico superior. A análise imediata permitiu determinar os teores de umidade, materiais voláteis e cinzas, bem como calcular o carbono fixo por diferença. Esses parâmetros indicam a proporção entre a fração combustível e a fração mineral do carvão, sendo esta última diretamente relacionada à formação de resíduos sólidos minerais durante a combustão.

A determinação do poder calorífico superior foi realizada como parâmetro complementar de caracterização energética, permitindo avaliar a quantidade de energia liberada durante a combustão completa da amostra. Em conjunto, os resultados da análise imediata e do poder calorífico superior fornecem uma base para discutir a qualidade do carvão de partida e sua relação com o contexto carbonífero de Candiota-RS.

As análises foram conduzidas com base em procedimentos normatizados pela ASTM, conforme descrito nos subtópicos seguintes, com o objetivo de assegurar maior padronização experimental e permitir a comparação dos resultados com dados reportados na literatura técnica.

4.3.1 Análise imediata

A análise imediata do carvão mineral foi realizada com o objetivo de determinar os teores de umidade, materiais voláteis, cinzas e carbono fixo. A umidade foi determinada a partir da perda de massa da amostra submetida à secagem em estufa

de esterilização e secagem, marca Nova Ética/Ethik Technology, linha 400 ND, conforme a ASTM D3173-11.

As determinações de materiais voláteis e cinzas foram conduzidas em forno mufla, marca Zezimaq, modelo 1.2.6, seguindo, respectivamente, os procedimentos descritos nas normas ASTM D3175-20 e ASTM D3174-12. O teor de materiais voláteis foi obtido a partir da perda de massa da amostra durante o aquecimento nas condições estabelecidas pela norma, enquanto o teor de cinzas foi determinado após a combustão da fração orgânica do carvão, permanecendo como resíduo a fração mineral incombustível.

O teor de carbono fixo foi calculado por diferença, considerando os percentuais de umidade, materiais voláteis e cinzas previamente determinados, conforme a ASTM D3172-13(2021)e1, por meio da Equação (1).

$$CF = 100 - (U + MV + CZ) \quad (1)$$

Fonte: ASTM D3172-13(2021)e1.

em que CF corresponde ao teor de carbono fixo (%), U ao teor de umidade (%), MV ao teor de materiais voláteis (%) e CZ ao teor de cinzas (%).

Os resultados da análise imediata foram expressos em porcentagem mássica e utilizados para discutir a composição do carvão mineral de partida, especialmente a relação entre sua fração combustível e sua fração mineral. Esses dados também auxiliaram na interpretação da tendência de geração de cinzas durante a combustão e na contextualização do resíduo utilizado nas formulações geopoliméricas.

4.3.2 Poder calorífico superior

A determinação do poder calorífico superior (PCS) do carvão mineral de partida foi realizada por calorimetria de combustão em bomba calorimétrica, com procedimento baseado na ASTM D5865/D5865M-19. Essa análise foi empregada como parâmetro complementar à análise imediata, permitindo avaliar a quantidade de energia liberada durante a combustão completa do combustível associado à geração da cinza pesada estudada.

O ensaio foi conduzido em calorímetro da marca *Parr Instrument Company*, modelo 6200, equipado com bomba calorimétrica, pertencente ao Laboratório de Energia e Carboquímica da Universidade Federal do Pampa, apresentado na Figura 9. Para a análise, utilizou-se aproximadamente 1,005 g de carvão mineral previamente seco. A amostra foi pesada em balança analítica, mantida em dessecador até o momento do ensaio e acondicionada no cadinho da bomba calorimétrica, juntamente com o fio de ignição.

A bomba calorimétrica foi pressurizada com oxigênio puro até aproximadamente 30 atm, condição adotada para garantir atmosfera oxidante suficiente para a combustão completa da amostra. Em seguida, a bomba foi inserida no compartimento calorimétrico contendo água, e o ensaio foi iniciado por ignição elétrica. Durante a combustão, o sistema registrou a variação de temperatura do meio calorimétrico, a partir da qual foi determinado o poder calorífico superior da amostra. O equipamento foi previamente calibrado com ácido benzoico, utilizado como padrão de referência para verificação da resposta calorimétrica.

Figura 9 - Sistema de calorimetria Parr 6200 com bomba calorimétrica



Fonte: Autor (2026).

Os resultados foram expressos em $\text{cal}\cdot\text{g}^{-1}$ e convertidos para $\text{MJ}\cdot\text{kg}^{-1}$, sendo utilizados como parâmetro de caracterização energética do carvão mineral de partida. Esses dados complementaram a análise imediata e contribuíram para relacionar a fração mineral e o potencial energético do carvão com o contexto de geração da cinza pesada empregada nas formulações geopoliméricas.

4.4 Obtenção e preparo da cinza pesada

A cinza pesada utilizada neste Trabalho foi obtida como resíduo proveniente da geração termelétrica a carvão mineral na região de Candiota–RS. O material foi recebido na forma de resíduo sólido e, após o recebimento, foi acondicionado em recipiente fechado até a realização das etapas de preparo físico e caracterização.

O preparo físico da cinza pesada foi realizado com a finalidade de padronizar a fração empregada nas análises e na produção dos geopolímeros, reduzindo a influência da heterogeneidade granulométrica característica desse tipo de resíduo. Para isso, o material foi submetido ao peneiramento a seco, sendo selecionada a fração passante na malha de abertura nominal igual a 0,248 mm, correspondente à peneira nº 60. Essa etapa permitiu limitar a dimensão máxima das partículas utilizadas no estudo, favorecendo maior uniformidade da amostra e melhor incorporação do resíduo à matriz geopolimérica.

O peneiramento foi realizado nos laboratórios da UNIPAMPA, Campus Bagé, utilizando um conjunto de peneiras granulométricas da marca Bertel, acoplado a um agitador eletromagnético de peneiras da mesma marca, modelo VP-01. O procedimento foi conduzido com base nos princípios de análise granulométrica por peneiramento estabelecidos pela ASTM C136/C136M-25. Após a separação granulométrica, a fração fina selecionada foi homogeneizada e destinada às etapas posteriores de caracterização e formulação. O sistema utilizado no preparo físico da cinza pesada é apresentado na Figura 10.

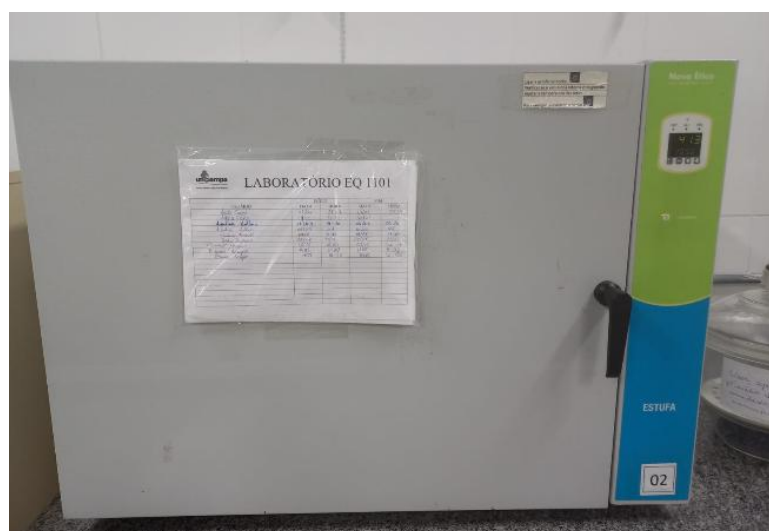
Figura 10 - Sistema de peneiramento utilizado no preparo físico da cinza pesada



Fonte: Autor (2026).

Após o peneiramento, a fração fina da cinza pesada foi submetida à secagem em estufa de esterilização e secagem da marca Nova Ética/Ethik Technology, linha 400 ND, disponível nos laboratórios da UNIPAMPA, Campus Bagé, à temperatura de 105 °C. Essa etapa teve como objetivo remover a umidade livre presente na amostra e favorecer maior estabilidade durante o armazenamento e a posterior incorporação nas formulações geopoliméricas. A estufa utilizada nessa etapa é apresentada na Figura 11.

Figura 11 - Estufa utilizada na secagem da fração passante da cinza pesada



Fonte: Autor (2026).

Após a secagem, a cinza pesada foi acondicionada em dessecador até sua utilização. A amostra preparada foi destinada às análises de caracterização química, estrutural e granulométrica, bem como à incorporação nas formulações geopoliméricas à base de metacaulim. Dessa forma, todas as etapas subsequentes do estudo foram realizadas com uma fração previamente peneirada, seca e homogeneizada.

4.5 Caracterização da cinza pesada

A caracterização da cinza pesada foi realizada com o objetivo de determinar as propriedades químicas, estruturais e granulométricas do resíduo utilizado nas formulações geopoliméricas. Para isso, empregou-se a fração fina previamente peneirada, seca e homogeneizada, conforme descrito no item 4.4, buscando reduzir a influência da heterogeneidade física do material.

Foram utilizadas as técnicas de Fluorescência de Raios X (FRX), espectroscopia Raman e classificação granulométrica por peneiramento. A FRX foi empregada para determinar a composição química global da cinza, expressa principalmente na forma de óxidos; a espectroscopia Raman foi utilizada como técnica complementar para avaliar aspectos estruturais do material; e a classificação granulométrica permitiu descrever a distribuição de tamanho das partículas da fração selecionada. Essa abordagem fornece subsídios para relacionar as características da cinza pesada com seu comportamento nas formulações geopoliméricas à base de metacaulim (El Alouani *et al.*, 2024; Ferreira *et al.*, 2025; Li *et al.*, 2024).

4.5.1 Fluorescência de Raios X (FRX)

A análise de Fluorescência de Raios X (FRX) foi realizada externamente no Laboratório de Controle da Qualidade da Cimento Itambé, localizado na unidade fabril de Balsa Nova-PR, utilizando um analisador de fluorescência de raios X por dispersão de energia, da marca Bruker Nano Analytics, modelo S1 TITAN 800. O ensaio teve como objetivo determinar a composição química global da cinza pesada utilizada neste Trabalho, com ênfase nos principais óxidos presentes no resíduo. Para a análise, foi utilizada a fração fina da cinza pesada previamente peneirada, seca e homogeneizada, conforme descrito no item 4.4. Os resultados foram fornecidos pelo laboratório na forma de percentuais mássicos dos principais óxidos identificados. A técnica foi empregada por ser amplamente utilizada na caracterização composicional de cinzas de carvão, precursores aluminosilicáticos e materiais aplicados em sistemas cimentícios e geopoliméricos, permitindo avaliar constituintes como SiO_2 , Al_2O_3 , Fe_2O_3 , CaO , MgO , K_2O , Na_2O e SO_3 (Aygün; Bilir; Uysal, 2024; Li *et al.*, 2024).

A utilização da FRX também se justifica pela existência de metodologia específica para determinação de elementos maiores e menores em cinzas de carvão por fluorescência de raios X, conforme descrito na ASTM D4326-21. Neste Trabalho, essa norma foi considerada como referência metodológica para a interpretação da aplicabilidade da técnica, embora a análise tenha sido realizada por laboratório externo, sem acesso detalhado às condições instrumentais empregadas.

Para a análise, utilizou-se a fração fina da cinza pesada previamente peneirada, seca e homogeneizada, conforme descrito no item 4.4. A amostra foi encaminhada

para análise externa, e os resultados foram fornecidos pelo laboratório responsável na forma de percentuais mássicos dos principais óxidos determinados.

Os resultados obtidos por FRX foram utilizados para avaliar a natureza silicoaluminosa da cinza pesada e sua compatibilidade preliminar com a produção de geopolímeros à base de metacaulim. A interpretação dos dados teve como foco principal os teores de SiO_2 e Al_2O_3 , por estarem associados aos constituintes de maior interesse para a formação da matriz geopolimérica. Também foram considerados os teores de CaO , Fe_2O_3 , MgO , K_2O , Na_2O , SO_3 e demais óxidos reportados, uma vez que esses componentes podem influenciar a reatividade do material, a formação de fases secundárias e o comportamento do sistema ativado alcalinamente.

4.5.2 Espectroscopia Raman

A espectroscopia Raman foi empregada como técnica complementar à Fluorescência de Raios X (FRX), com o objetivo de avaliar aspectos estruturais da cinza pesada utilizada nas formulações geopoliméricas. Enquanto a FRX fornece a composição química global do resíduo, expressa principalmente na forma de óxidos, a espectroscopia Raman permite obter informações associadas às vibrações moleculares, às ligações químicas e ao grau de organização estrutural dos constituintes presentes no material.

As análises foram realizadas nos laboratórios da UNIPAMPA, Campus Bagé, utilizando um espectrômetro Raman confocal Voyage™, da marca B&W Tek, modelo BWS532, acoplado a um microscópio óptico Olympus, conforme apresentado na Figura 12. No ensaio, utilizou-se a fração fina da cinza pesada previamente peneirada, seca e homogeneizada, conforme descrito no item 4.4. A amostra foi disposta sobre suporte apropriado, formando uma camada representativa para a incidência do laser, buscando-se evitar regiões com acúmulo excessivo de partículas, segregação granulométrica ou heterogeneidade visual acentuada.

Figura 12 - Espectrômetro Raman utilizado na análise estrutural da cinza pesada



Fonte: Autor (2026).

Antes da aquisição dos espectros da cinza pesada, foi realizada a verificação do posicionamento espectral do equipamento utilizando padrão de silício (Si), conforme procedimento de controle instrumental associado à obtenção de espectros Raman. Essa etapa teve como finalidade conferir a resposta do sistema antes das medidas da amostra, contribuindo para maior confiabilidade na interpretação dos deslocamentos Raman registrados. A condução das análises seguiu princípios gerais de obtenção, verificação de desempenho e relato de espectros Raman descritos na ASTM E1683-02(2022), bem como recomendações associadas ao uso de padrões de deslocamento Raman para calibração espectral apresentadas na ASTM E1840-96(2022).

Os espectros foram obtidos utilizando laser de excitação de 532 nm, objetiva de 40× e configuração de aquisição de 10 acumulações com tempo de 10 s por acumulação. A potência do laser foi ajustada conforme a resposta da amostra, sendo registrada a condição de 100% na configuração instrumental utilizada. Também foram avaliadas diferentes aberturas de fenda de entrada do espectrômetro, correspondentes às configurações instrumentais de *slit* 50, 100 e 200, com o objetivo de verificar a condição mais adequada de aquisição em termos de intensidade do sinal, definição das bandas e relação sinal-ruído.

A interpretação dos espectros foi realizada de forma qualitativa, a partir da identificação das principais bandas observadas e da comparação com dados

reportados na literatura para cinzas de carvão, materiais aluminosilicáticos e óxidos inorgânicos. Foram avaliadas possíveis bandas associadas a estruturas silicatadas e aluminossilicáticas, óxidos metálicos e sinais relacionados à presença de carbono residual. Bandas mais estreitas e bem definidas foram associadas a estruturas mais ordenadas, enquanto bandas largas ou regiões de maior intensidade difusa foram interpretadas como indicativas de maior desordem estrutural do material.

Os resultados obtidos por espectroscopia Raman foram utilizados de forma complementar aos dados de FRX e de granulometria. Dessa forma, a técnica auxiliou na avaliação da organização estrutural da cinza pesada e forneceu subsídios para discutir sua compatibilidade com sistemas ativados alcalinamente. Ressalta-se que a espectroscopia Raman foi empregada como ferramenta de apoio estrutural, não substituindo uma identificação mineralógica direta por difração de raios X.

4.5.3 Classificação granulométrica

A classificação granulométrica da cinza pesada foi realizada com o objetivo de avaliar a distribuição de tamanho das partículas da fração empregada nas etapas de caracterização e nas formulações geopoliméricas. Essa análise foi considerada importante porque a granulometria influencia diretamente a área superficial disponível, o empacotamento das partículas, a interação entre os constituintes da mistura e a incorporação do resíduo à matriz geopolimérica.

O procedimento foi conduzido com base nos princípios de análise granulométrica por peneiramento descritos na ASTM C136/C136M-25, com adaptações em razão da natureza residual, heterogênea e particulada da cinza pesada. Para a análise, utilizou-se a fração previamente seca e homogeneizada, conforme descrito no item 4.4. O peneiramento foi realizado em conjunto de peneiras granulométricas da marca Bertel, acoplado a agitador eletromagnético de peneiras da mesma marca, permitindo a separação das partículas em diferentes intervalos de tamanho.

O sistema utilizado na classificação granulométrica da cinza pesada é apresentado na Figura 13. A identificação desse procedimento permite documentar a etapa de separação das frações e reforçar a importância da padronização física do resíduo antes de sua incorporação nas formulações geopoliméricas.

Figura 13 - Sistema de peneiramento utilizado na classificação granulométrica



Fonte: Autor (2026).

Após o peneiramento, as massas retidas em cada peneira foram determinadas em balança analítica e utilizadas para calcular a porcentagem retida, a porcentagem retida acumulada e a porcentagem passante acumulada. Esses parâmetros permitiram descrever a distribuição granulométrica da cinza pesada e avaliar a predominância de partículas mais finas ou mais grosseiras na fração analisada.

4.6 Planejamento das formulações geopoliméricas

O planejamento das formulações geopoliméricas foi realizado com base em uma matriz à base de metacaulim, empregando ativação alcalina com hidróxido de sódio e fonte silicatada complementar. A definição das proporções foi conduzida a partir da metodologia descrita por Ju *et al.* (2023), com adaptações às matérias-primas disponíveis neste Trabalho, especialmente em relação ao uso da fonte silicatada obtida a partir da evaporação da solução comercial Sicol 30 e à incorporação da cinza pesada proveniente da região de Candiota-RS.

As formulações foram planejadas pelo método de mistura a seco, adotando-se uma relação molar nominal Si/Al igual a 1,8, uma relação água/sólidos igual a 0,5 e uma concentração da solução alcalina de NaOH igual a $10 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$, correspondente à condição M10. A relação Si/Al nominal foi calculada com base nas contribuições do metacaulim e da fonte silicatada complementar, sem considerar diretamente a contribuição de silício e alumínio da cinza pesada. Essa simplificação foi adotada

porque a disponibilidade reativa desses elementos no resíduo não pode ser considerada equivalente à dos precursores principais. O teor de cinza pesada foi definido como fração mássica da pasta fresca, sendo o resíduo incorporado à fase sólida da mistura.

Inicialmente, foi estabelecida a massa de pasta geopolimérica a ser preparada em cada formulação. Em razão da disponibilidade limitada da fonte silicatada complementar, optou-se pela utilização de corpos de prova cilíndricos de menores dimensões em relação ao planejamento inicialmente previsto. Assim, foram adotados moldes cilíndricos com diâmetro interno de 40 mm e altura de 80 mm, mantendo-se a relação altura/diâmetro igual a 2. Essa relação geométrica foi preservada para garantir a proporcionalidade dimensional dos corpos de prova destinados ao ensaio de resistência à compressão.

O volume aproximado de cada corpo de prova foi calculado conforme a Equação (2).

$$V = \pi r^2 h \quad (2)$$

Fonte: Elaborado pelo autor (2026).

em que V corresponde ao volume do corpo de prova, r ao raio interno do molde e h à altura do corpo de prova. Considerando $d = 40$ mm, $r = 20$ mm e $h = 80$ mm, obteve-se volume aproximado de $100,53 \text{ cm}^3$ por corpo de prova. Com base nesse volume e considerando perdas inerentes às etapas de mistura, transferência e moldagem, foi definida uma batelada de 750 g de pasta geopolimérica para cada formulação, suficiente para a produção de três corpos de prova cilíndricos de 40×80 mm.

Foram definidas três formulações geopoliméricas: uma formulação de referência, sem adição de cinza pesada, denominada RefM10; uma formulação contendo 5% de cinza pesada, denominada D05M10; e uma formulação contendo 10% de cinza pesada, denominada D10M10. A sigla M10 indica a concentração da solução alcalina de NaOH utilizada no preparo das pastas, correspondente a $10 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$.

Dessa forma, foi produzido um corpo de prova por formulação em cada idade de cura, totalizando 9 corpos de prova, conforme apresentado na Tabela 1.

Tabela 1 - Planejamento dos corpos de prova geopoliméricos

Formulação	Teor de cinza pesada	7 dias	14 dias	28 dias	Total de corpos de prova
RefM10	0%	1	1	1	3
D05M10	5%	1	1	1	3
D10M10	10%	1	1	1	3
Total	-	3	3	3	9

Fonte: Autor (2026).

O planejamento inicial também contemplou corpos de prova destinados à avaliação aos 28 dias. Entretanto, o escopo experimental consolidado neste Trabalho concentrou-se nos resultados obtidos aos 7 e 14 dias de cura, permanecendo a análise em idade mais avançada como perspectiva de continuidade da investigação.

A fração mássica de água na pasta foi determinada a partir da relação água/sólidos adotada no planejamento experimental. Considerando que a massa total da pasta corresponde à soma da massa de água com a massa de sólidos, a fração de água foi calculada conforme a Equação (3).

$$f_{\text{água}} = \frac{\frac{R_w}{s}}{\left(1 + \frac{R_w}{s}\right)} \quad (3)$$

Fonte: Elaborado pelo autor (2026).

em que $f_{\text{água}}$ corresponde à fração mássica de água na pasta e $R_{w/s}$ corresponde à relação água/sólidos adotada. A massa de água destilada utilizada em cada formulação foi então determinada conforme a Equação (4).

$$m_{\text{água}} = m_{\text{pasta}} \cdot f_{\text{água}} \quad (4)$$

Fonte: Elaborado pelo autor (2026).

em que $m_{\text{água}}$ corresponde à massa de água destilada e m_{pasta} à massa total da batelada de pasta geopolimérica.

A massa de NaOH sólido foi calculada a partir da concentração da solução alcalina, considerando a massa de água adotada para cada formulação. Admitindo-se a densidade da água como aproximadamente $1 \text{ g}\cdot\text{mL}^{-1}$, a massa de água foi convertida em volume para o cálculo da quantidade de NaOH necessária à obtenção da solução alcalina de $10 \text{ mol}\cdot\text{L}^{-1}$, conforme a Equação (5).

$$m_{\text{NaOH}} = C_{\text{NaOH}} \cdot V_{\text{água}} \cdot MM_{\text{NaOH}} \quad (5)$$

Fonte: Elaborado pelo autor (2026).

em que m_{NaOH} corresponde à massa de hidróxido de sódio, C_{NaOH} à concentração molar da solução, $V_{\text{água}}$ ao volume de água utilizado e MM_{NaOH} à massa molar do hidróxido de sódio.

A relação entre fonte silicatada complementar e metacaulim foi definida a partir da composição química dos materiais determinada por fluorescência de raios X, considerando os teores de SiO_2 e Al_2O_3 presentes no metacaulim e na fonte silicatada obtida a partir da evaporação da Sicol 30. A razão operacional entre a massa de fonte silicatada e a massa de metacaulim foi calculada de modo a obter uma relação molar nominal Si/Al igual a 1,8, considerando somente os teores de SiO_2 e Al_2O_3 do metacaulim e da fonte silicatada complementar, conforme a Equação (6).

$$R = \frac{m_{FS}}{m_{MK}} \quad (6)$$

Fonte: Elaborado pelo autor com base em Ju et al. (2023).

em que R corresponde à razão operacional entre a fonte silicatada complementar e o metacaulim. Nas condições adotadas, obteve-se $R = 0,3125$, indicando que, para cada 1 g de metacaulim, foram utilizados 0,3125 g de fonte silicatada complementar. Essa proporção entre a fonte silicatada complementar e o metacaulim foi mantida nas formulações. Entretanto, a relação Si/Al global das misturas pode apresentar variações devido à incorporação da cinza pesada, cuja contribuição química e disponibilidade reativa não foram incluídas diretamente no cálculo nominal.

A massa de cinza pesada foi determinada como fração da massa total da pasta fresca, conforme a Equação (7).

$$m_{cinza} = m_{pasta} \cdot x_{cinza} \quad (7)$$

Fonte: Elaborado pelo autor (2026).

em que m_{cinza} corresponde à massa de cinza pesada, m_{pasta} à massa total da batelada e x_{cinza} ao teor mássico de cinza adotado em cada formulação. Para a batelada de 750 g, os teores de 5% e 10% corresponderam, respectivamente, a 37,50 g e 75,00 g de cinza pesada.

Após a definição das massas de água, NaOH e cinza pesada, a massa remanescente foi distribuída entre metacaulim e fonte silicatada complementar. A massa disponível para esses dois constituintes foi calculada conforme a Equação (8).

$$m_{MK+FS} = m_{pasta} - m_{água} - m_{NaOH} - m_{cinza} \quad (8)$$

Fonte: Elaborado pelo autor (2026).

em que m_{MK+FS} corresponde à massa disponível para metacaulim e fonte silicatada complementar. Como a fonte silicatada foi definida em função da massa de metacaulim, a massa de metacaulim foi determinada conforme a Equação (9).

$$m_{MK} = \frac{m_{MK+FS}}{(1+R)} \quad (9)$$

Fonte: Elaborado pelo autor (2026).

A massa de fonte silicatada complementar foi então calculada conforme a Equação (10).

$$m_{FS} = R \cdot m_{MK} \quad (10)$$

Fonte: Elaborado pelo autor (2026).

Com base nesse procedimento, foram determinadas as massas de cada constituinte para as formulações RefM10, D05M10 e D10M10. A Tabela 2 apresenta as formulações calculadas para a produção das pastas geopoliméricas.

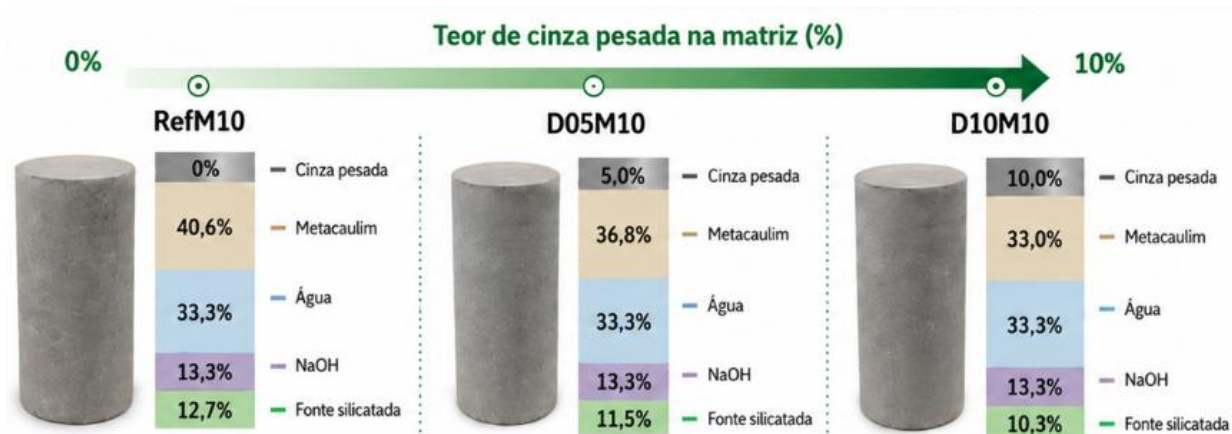
Tabela 2 - Formulações geopoliméricas calculadas

Formulação	Cinza pesada (g)	Metacaulim (g)	Água destilada (g)	NaOH (g)	Fonte silicatada (g)	Total (g)
RefM10	0	304,76	250,0	100,0	95,24	750,0
D05M10	37,50	276,19	250,0	100,0	86,31	750,0
D10M10	75,0	247,62	250,0	100,0	77,38	750,0
Total	112,5	828,57	750,0	300,0	258,93	2250,0

Fonte: Autor (2026).

A distribuição mássica dos constituintes das formulações é apresentada de forma comparativa na Figura 14. A representação evidencia o aumento progressivo do teor de cinza pesada e a correspondente redução das frações de metacaulim e da fonte silicatada complementar, mantendo-se constantes os teores de água e NaOH.

Figura 14 - Composição percentual em massa das formulações geopoliméricas



Fonte: Autor, produzido com auxílio da inteligência artificial generativa ChatGPT (OpenAI) (2026).

A formulação RefM10 corresponde à matriz geopolimérica de referência, sem adição de cinza pesada. As formulações D05M10 e D10M10 correspondem às pastas

contendo, respectivamente, 5% e 10% de cinza pesada incorporada à mistura. Dessa forma, o planejamento permitiu avaliar o efeito do aumento do teor de cinza pesada sobre a matriz geopolimérica, mantendo constantes a relação água/sólidos, a concentração da solução alcalina de NaOH e a proporção operacional entre o metacaulim e a fonte silicatada complementar. A relação Si/Al de 1,8 corresponde, portanto, a um valor nominal calculado a partir desses dois precursores.

A massa total de fonte silicatada complementar necessária para a execução das três formulações foi de aproximadamente 258,93 g. Considerando a disponibilidade de material obtido a partir da evaporação da solução Sicol 30, esse planejamento permitiu a produção das formulações previstas e dos corpos de prova correspondentes às idades de 7, 14 e 28 dias.

Devido à produção de um corpo de prova por formulação em cada idade de cura, os resultados de resistência à compressão serão interpretados como uma avaliação exploratória do efeito do teor de cinza pesada e do tempo de cura sobre as matrizes geopoliméricas, sem aplicação de análise estatística inferencial.

4.7 Produção das pastas geopoliméricas por mistura a seco

A produção das pastas geopoliméricas foi conduzida pelo método de mistura a seco, com adaptação da rota experimental descrita por Ju *et al.* (2023). Nesse procedimento, a fase sólida é inicialmente preparada e homogeneizada separadamente, enquanto a solução ativadora alcalina é produzida previamente e incorporada posteriormente aos sólidos. A adoção desse método teve como objetivo favorecer a distribuição da cinza pesada no metacaulim antes do contato com o meio alcalino, reduzindo a formação de regiões localizadas com maior concentração de resíduo e contribuindo para maior uniformidade inicial das pastas.

A solução ativadora foi preparada individualmente para cada formulação, conforme as massas definidas no planejamento experimental. Inicialmente, a água destilada foi adicionada a béqueres previamente limpos, secos e identificados de acordo com as formulações RefM10, D05M10 e D10M10. Em seguida, o hidróxido de sódio sólido foi adicionado lentamente sobre a água, em pequenas porções, sob agitação controlada. Esse procedimento foi adotado em razão do caráter exotérmico da dissolução do NaOH, buscando evitar aquecimento excessivo localizado, projeções de solução e perdas de material.

Após a dissolução completa do NaOH, as soluções alcalinas foram mantidas em repouso até atingirem temperatura próxima à ambiente. Somente após essa etapa, a fonte silicatada complementar, previamente obtida a partir da evaporação da solução comercial Sicol 30, foi adicionada à solução alcalina correspondente a cada formulação. A incorporação da fonte silicatada ao meio alcalino foi realizada antes da mistura com os sólidos, de modo a favorecer sua dispersão e interação com a solução ativadora.

As soluções contendo NaOH e fonte silicatada complementar foram mantidas sob agitação magnética e aquecimento a 75 °C por 18 h. Durante esse período, os recipientes foram cobertos parcialmente, sem vedação completa, com o objetivo de reduzir perdas excessivas por evaporação e, ao mesmo tempo, permitir a saída de vapor. Antes do início do aquecimento, a massa de cada conjunto foi registrada. Ao final das 18 h, os ativadores foram resfriados até temperatura ambiente e novamente pesados. Quando observada perda de massa, esta foi corrigida pela adição cuidadosa de água destilada até o retorno à massa inicial do ativador. Esse controle foi adotado para preservar a relação água/sólidos estabelecida no planejamento das formulações.

Paralelamente ao preparo dos ativadores, a fase sólida foi preparada em recipientes secos e identificados. Para a formulação RefM10, foi utilizado metacaulim como precursor aluminossilicático principal. Para as formulações D05M10 e D10M10, a cinza pesada previamente seca, homogeneizada e passante na peneira nº 60, com abertura de 0,248 mm, foi incorporada ao metacaulim nos teores definidos no planejamento experimental. A homogeneização da fase sólida foi realizada manualmente, com auxílio de bastão de vidro, por aproximadamente 3 a 5 min, com raspagem do fundo e das paredes do recipiente, até obtenção de uma mistura visualmente uniforme.

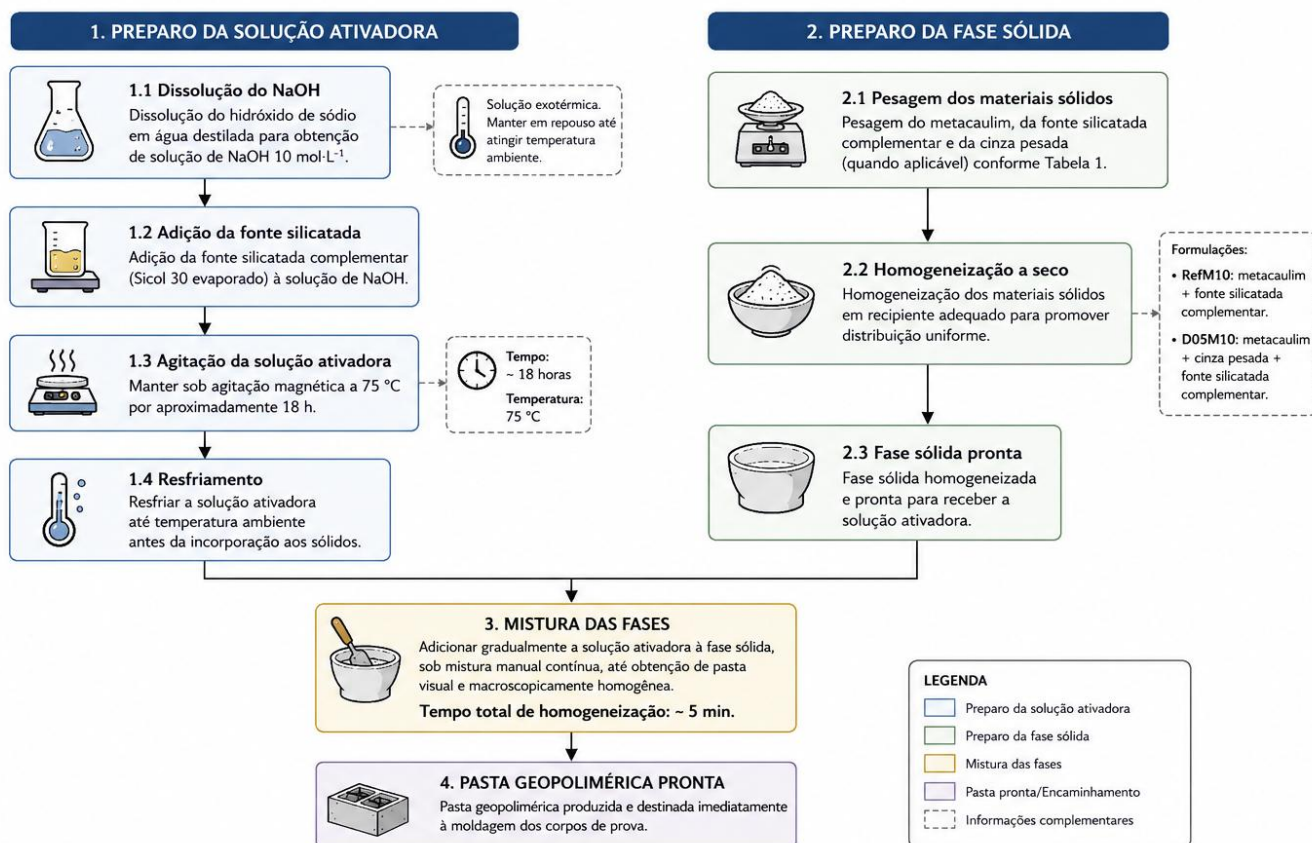
Após o resfriamento dos ativadores e a preparação da fase sólida, a produção das pastas foi realizada pela adição gradual da solução ativadora ao recipiente contendo os sólidos. A adição foi feita em porções, sob mistura manual contínua, a fim de favorecer o molhamento progressivo das partículas, reduzir a formação de grumos e evitar a permanência de regiões secas. Após a adição total do ativador, a pasta foi homogeneizada por aproximadamente 5 min, com raspagem periódica do fundo e das laterais do recipiente.

Não foi realizada adição extra de água após o início da mistura, a fim de preservar a relação água/sólidos definida no planejamento experimental. As pastas

obtidas foram imediatamente destinadas à etapa de moldagem, minimizando variações associadas ao avanço das reações de ativação alcalina antes do preenchimento dos moldes.

A sequência operacional adotada para a produção das pastas geopoliméricas pelo método de mistura a seco é apresentada na Figura 15. O fluxograma sintetiza as etapas de preparo da solução alcalina, incorporação da fonte silicatada complementar ao ativador, homogeneização da fase sólida, adição gradual do ativador aos sólidos e obtenção da pasta geopolimérica destinada à moldagem.

Figura 15 - Fluxograma da produção das pastas geopoliméricas



Fonte: Autor, produzido com auxílio da inteligência artificial generativa ChatGPT (OpenAI) (2026).

4.8 Moldagem e cura dos corpos de prova

As formulações RefM10, D05M10 e D10M10 foram moldadas imediatamente após a produção das pastas geopoliméricas, com o objetivo de reduzir variações associadas ao avanço das reações de ativação alcalina antes do preenchimento dos

moldes. Essa etapa foi conduzida de forma sequencial para todas as formulações, buscando manter condições semelhantes de preparo, moldagem e início de cura.

Os corpos de prova foram moldados em geometria cilíndrica, utilizando moldes confeccionados a partir de tubos de PVC, com diâmetro interno de 40 mm e altura de 80 mm. Essa geometria foi adotada para manter a relação altura/diâmetro igual a 2, preservando a proporcionalidade dimensional dos corpos de prova destinados ao ensaio de resistência à compressão. A redução das dimensões em relação ao planejamento inicialmente previsto foi necessária em razão da disponibilidade limitada da fonte silicatada complementar, permitindo avaliar três formulações e três idades de cura.

A moldagem foi conduzida com base em princípios gerais de referências normativas aplicáveis à produção de corpos de prova cilíndricos. A ABNT NBR 5738:2015 e a ASTM C470/C470M-23 foram consultadas como orientação para a obtenção de moldes com geometria regular, rigidez suficiente e condições adequadas de preenchimento. Entretanto, os tubos de PVC com dimensões nominais de 40 × 80 mm foram confeccionados especificamente para este Trabalho, em razão da quantidade limitada de material disponível, não correspondendo integralmente às dimensões padronizadas para corpos de prova de concreto. Dessa forma, a moldagem deve ser interpretada como um procedimento experimental adaptado.

A utilização de tubos de PVC como moldes foi adotada como adaptação experimental, considerando a disponibilidade de material, a facilidade de corte nas dimensões desejadas e a possibilidade de obtenção de corpos de prova com geometria cilíndrica regular. Antes da moldagem, os tubos foram cortados, limpos, secos e identificados de acordo com a formulação e a idade de cura.

As pastas recém-preparadas foram transferidas para os moldes de forma gradual, buscando o preenchimento uniforme do volume interno e a redução da incorporação de vazios. A moldagem foi realizada em camadas sucessivas, com leve adensamento manual entre as camadas, a fim de favorecer o acomodamento da pasta no interior do molde. Durante o preenchimento, procurou-se raspar as paredes do recipiente de mistura e transferir a maior quantidade possível de pasta para os moldes, minimizando perdas de material.

Após o preenchimento, a superfície superior dos corpos de prova foi regularizada manualmente com espátula, buscando reduzir irregularidades geométricas que pudessem interferir no contato com os pratos da prensa durante o

ensaio de compressão. Em seguida, os moldes contendo as pastas geopoliméricas foram mantidos em capela de exaustão ligada, à temperatura ambiente, sem aplicação de cura térmica acelerada ou controle de umidade.

A permanência dos corpos de prova nos moldes até o momento do ensaio foi adotada como condição experimental deste Trabalho. Dessa forma, os moldes de PVC atuaram como estrutura de contenção lateral das pastas durante o período de cura, enquanto a superfície superior permaneceu exposta às condições do ambiente da capela. Essa condição não corresponde a uma cura selada, uma vez que não houve vedação completa das amostras nem controle específico de umidade durante o período de cura.

A desmoldagem foi realizada somente antes dos ensaios de resistência à compressão, de acordo com a idade de cura estabelecida para cada amostra. Para os corpos de prova avaliados mecanicamente neste Trabalho, a desmoldagem ocorreu nas idades de 7 e 14 dias. Antes do ensaio, cada amostra foi cuidadosamente retirada do molde, identificada e inspecionada visualmente quanto à integridade, regularidade geométrica e presença de fissuras ou defeitos aparentes.

A cura em temperatura ambiente foi adotada para avaliar o desenvolvimento das matrizes geopoliméricas sem aplicação de tratamento térmico, mantendo o foco na influência do teor de cinza pesada e do tempo de cura sobre o desempenho mecânico. Essa condição experimental representa uma rota de cura simplificada, compatível com as limitações operacionais do estudo e com o caráter exploratório da avaliação mecânica realizada.

Foram produzidos 9 corpos de prova no total, sendo um corpo de prova por formulação para cada idade inicialmente planejada de cura: 7, 14 e 28 dias. Entretanto, no presente Trabalho, a avaliação mecânica por resistência à compressão foi realizada apenas para as idades de 7 e 14 dias, totalizando 6 corpos de prova ensaiados. Os corpos de prova correspondentes à idade de 28 dias foram produzidos, mas não foram considerados na discussão dos resultados mecânicos apresentados neste estudo. A identificação das amostras foi realizada de acordo com a formulação geopolimérica e o tempo de cura, conforme apresentado na Tabela 3.

Tabela 3 - Identificação dos corpos de prova geopoliméricos

Identificação	Formulação	Teor de cinza	Idade de cura
RefM10 - 7	RefM10	0%	7 dias
RefM10 - 14	RefM10	0%	14 dias
RefM10 - 28	RefM10	0%	28 dias
D05M10 - 7	D05M10	5%	7 dias
D05M10 - 14	D05M10	5%	14 dias
D05M10 - 28	D05M10	5%	28 dias
D10M10 - 7	D10M10	10%	7 dias
D10M10 - 14	D10M10	10%	14 dias
D10M10 - 28	D10M10	10%	28 dias

Fonte: Autor (2026).

O sistema de moldagem utilizado para obtenção dos corpos de prova cilíndricos é apresentado na Figura 16. A imagem evidencia os moldes de PVC empregados na etapa experimental, cuja geometria foi definida para manter a relação altura/diâmetro igual a 2.

Figura 16 - Moldes de PVC para obtenção dos corpos de prova geopoliméricos



Fonte: Autor (2026).

Após o período de cura e a retirada dos moldes de PVC, os corpos de prova foram identificados e inspecionados visualmente quanto à integridade, à geometria e

à presença de defeitos aparentes. A Figura 17 apresenta os corpos de prova representativos das formulações RefM10, D05M10 e D10M10 após 14 dias de cura.

Figura 17 - Corpos de prova geopoliméricos após 14 dias de cura



Fonte: Autor (2026).

4.9 Ensaio de resistência à compressão

A resistência à compressão dos corpos de prova geopoliméricos foi determinada por ensaio de compressão axial, com o objetivo de avaliar comparativamente o desempenho mecânico das formulações nas idades de 7 e 14 dias. Embora tenham sido produzidos corpos de prova destinados à idade de 28 dias, esses não foram incluídos nos ensaios apresentados neste Trabalho.

O procedimento experimental foi conduzido com base nos princípios gerais da ABNT NBR 5739:2018 e da ASTM C39/C39M-24, aplicáveis à determinação da resistência à compressão de corpos de prova cilíndricos de concreto. Entretanto, em razão da natureza geopolimérica das matrizes, das dimensões nominais de 40 × 80 mm, do uso de moldes confeccionados em PVC e da produção de um corpo de prova por formulação em cada idade, o ensaio não deve ser interpretado como atendimento integral às referidas normas, mas como um procedimento experimental adaptado para fins comparativos.

Os corpos de prova permaneceram nos moldes até as respectivas idades de ensaio e foram desmoldados imediatamente antes da avaliação mecânica. Após a desmoldagem, cada amostra foi inspecionada visualmente quanto à presença de fissuras, falhas de moldagem, vazios aparentes, lascamentos e irregularidades nas

faces de contato. O diâmetro e a altura de cada corpo de prova foram determinados com auxílio de paquímetro digital, utilizando-se o diâmetro real medido para o cálculo da área resistente.

Os ensaios foram realizados nos laboratórios da UNIPAMPA, Campus Bagé, utilizando uma máquina universal de ensaios eletromecânica da marca EMIC, modelo DL 20000, com capacidade máxima de 100 kN. Cada corpo de prova foi centralizado entre os pratos do equipamento e submetido à aplicação monotônica de carga axial até a ruptura. A força máxima registrada foi utilizada para o cálculo da resistência à compressão.

A resistência à compressão foi calculada pela razão entre a força máxima aplicada e a área da seção transversal do corpo de prova, conforme a Equação (11).

$$f_c = \frac{F_{max}}{A} \quad (11)$$

Fonte: ABNT NBR 5739:2018 e ASTM C39/C39M-24.

em que f_c corresponde à resistência à compressão, expressa em MPa; F_{max} corresponde à força máxima registrada no ensaio, expressa em N; e A corresponde à área da seção transversal do corpo de prova.

A área da seção transversal foi determinada a partir do diâmetro médio medido em cada corpo de prova, conforme a Equação (12).

$$A = \frac{\pi d^2}{4} \quad (12)$$

Fonte: Elaborado pelo autor (2026).

em que A corresponde à área da seção transversal, expressa em mm², e d ao diâmetro médio do corpo de prova, expresso em mm. Para os corpos de prova com diâmetro nominal de 40 mm, a área teórica corresponde a aproximadamente 1256,64 mm². No entanto, para o tratamento dos dados experimentais, utilizou-se a área calculada a partir do diâmetro médio medido em cada amostra.

Os resultados foram expressos em MPa, unidade equivalente a N·mm⁻², e analisados comparativamente entre a formulação de referência e as formulações

contendo cinza pesada. Como foi produzido um corpo de prova por formulação em cada idade de cura, os resultados foram interpretados como avaliação exploratória do comportamento mecânico das matrizes geopoliméricas, sem aplicação de análise estatística inferencial.

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Este capítulo apresenta e discute os resultados obtidos na investigação da cinza pesada de Candiota-RS como componente parcial em formulações geopoliméricas à base de metacaulim. A organização da discussão segue a sequência experimental adotada no Trabalho, iniciando pela caracterização do carvão mineral de partida, avançando para o preparo e caracterização da cinza pesada e, por fim, relacionando esses resultados ao comportamento das formulações geopoliméricas produzidas.

Inicialmente, são apresentados os resultados da análise imediata e do poder calorífico superior do carvão mineral, com foco na interpretação da fração mineral e do potencial energético do material de origem. Em seguida, são discutidos os resultados associados à preparação física da cinza pesada, à obtenção da fonte silicatada complementar a partir da solução Sicol 30 e à caracterização química, estrutural e granulométrica dos materiais utilizados.

Por fim, são apresentados os resultados de resistência à compressão dos corpos de prova avaliados aos 7 e 14 dias, buscando relacionar o efeito da incorporação de 5% e 10% de cinza pesada com o desempenho mecânico inicial das matrizes geopoliméricas. Os corpos de prova correspondentes à idade de 28 dias foram produzidos, mas não foram incluídos na análise mecânica apresentada neste Trabalho.

A discussão dos resultados foi conduzida de forma comparativa e exploratória, considerando a produção de um corpo de prova por formulação em cada idade de cura.

5.1 Caracterização complementar do carvão mineral de partida

Os resultados da análise imediata do carvão mineral de partida são apresentados na Tabela 4. Esses dados permitem interpretar a relação entre a fração combustível e a fração mineral do material associado à geração da cinza pesada utilizada neste Trabalho.

Tabela 4 - Resultados da análise imediata do carvão mineral de partida

Parâmetro	Resultado (%)
Umidade	9,83
Materiais voláteis	23,5
Cinzas	55,0
Carbono fixo (b.u.)	11,67

Fonte: Autor (2026).

O carvão mineral analisado apresentou teor de umidade de 9,83%, indicando a presença de água associada à amostra nas condições de análise. Embora esse parâmetro não esteja diretamente relacionado à formação da cinza pesada, ele contribui para a interpretação do comportamento energético do combustível, uma vez que parte da energia liberada durante a combustão pode ser consumida na evaporação da água presente no material.

O teor de materiais voláteis foi de 23,50%, valor próximo ao reportado por Linhares *et al.* (2024) para carvão mineral de Candiota–RS, cujo teor de matéria volátil foi de 23,10%. Essa proximidade indica coerência entre o carvão avaliado neste Trabalho e materiais da mesma região carbonífera descritos na literatura.

O resultado de maior relevância para este estudo foi o teor de cinzas, correspondente a 55,00% da amostra. Esse valor evidencia a elevada participação da fração mineral no carvão de partida e reforça a tendência de geração expressiva de resíduos sólidos minerais durante a combustão. Linhares *et al.* (2024) também reportaram teor de cinzas de 55,00% para carvão de Candiota–RS, confirmando a compatibilidade do resultado obtido com dados recentes da literatura regional. De forma complementar, Silva (2013) destaca que o carvão bruto de mina, denominado ROM, do inglês *run of mine*, destinado ao abastecimento da Usina Presidente Médici, não deve ultrapassar 59% de cinzas, valor próximo ao observado neste Trabalho.

O teor de carbono fixo, calculado por diferença em base úmida, foi de 11,67%, valor inferior aos teores de cinzas e de materiais voláteis. Esse resultado indica que a fração carbonosa remanescente representa parcela relativamente baixa da amostra, característica compatível com carvões de elevada fração mineral. Essa condição confirma que parte expressiva da composição do carvão está associada à fração inorgânica, o que contribui para a maior geração de resíduos minerais durante a combustão.

As condições e o resultado obtido no ensaio de poder calorífico superior são apresentados na Tabela 5.

Tabela 5 - Condições e resultado do ensaio de poder calorífico superior

Parâmetro	Resultado
Massa da amostra (g)	1,0010
Temperatura inicial (°C)	33,5559
Elevação de temperatura (°C)	1,2834
Poder calorífico superior (cal.g ⁻¹)	3025,97
Poder calorífico superior (MJ.kg ⁻¹)	12,66

Fonte: Autor (2026).

O poder calorífico superior obtido para o carvão mineral de partida foi de 3025,97 cal·g⁻¹, equivalente a 12,66 MJ·kg⁻¹. Esse valor indica potencial energético moderado a baixo, comportamento compatível com o elevado teor de cinzas observado na análise imediata. Como a fração mineral do carvão não contribui diretamente para a liberação de energia durante a combustão, sua elevada participação tende a reduzir a energia liberada por unidade de massa do combustível.

Para contextualizar o resultado obtido, a Tabela 6 apresenta uma comparação entre o poder calorífico determinado neste Trabalho e valores reportados em estudos sobre carvões de Candiota-RS e carvões brasileiros.

Tabela 6 - Comparação do poder calorífico do carvão mineral

Fonte	Material avaliado	Poder calorífico (MJ.kg ⁻¹)
Este Trabalho	Carvão de Candiota-RS	12,66
Linhares <i>et al.</i> (2024)	Carvão de Candiota-RS	10,26 – 14,46
Lucena <i>et al.</i> (2023)	Carvão de Candiota-RS	16,10 – 19,67
Kalkreuth <i>et al.</i> (2024)	Carvões brasileiros	12,02 – 27,13

Fonte: Autor (2026).

A comparação apresentada na Tabela 6 indica que o carvão mineral avaliado neste Trabalho se encontra dentro da faixa reportada por Linhares *et al.* (2024) para carvões de Candiota-RS, entre 10,26 e 14,46 MJ·kg⁻¹. O valor obtido também está

próximo ao limite inferior da faixa indicada por Kalkreuth *et al.* (2024) para carvões brasileiros, entre 12,02 e 27,13 MJ·kg⁻¹, demonstrando coerência com dados reportados para materiais carboníferos nacionais.

Por outro lado, o poder calorífico determinado neste estudo foi inferior aos valores reportados por Lucena *et al.* (2023), que observaram faixa de 16,10 a 19,67 MJ·kg⁻¹ para carvão de Candiota-RS. Essa diferença pode estar associada à variabilidade natural do carvão mineral, à origem específica da amostra, à fração analisada, às condições de preparo e, principalmente, ao elevado teor de cinzas observado neste Trabalho.

A relação entre o poder calorífico e o teor de cinzas é central para a interpretação dos resultados. No presente estudo, o teor de cinzas de 55,00% indica elevada participação da fração inorgânica no carvão de partida. Embora o PCS obtido esteja dentro da faixa reportada para carvões de Candiota-RS, seu valor permanece condicionado pela expressiva presença de material mineral, que não participa diretamente da liberação de energia durante a combustão.

Dessa forma, os resultados da caracterização complementar do carvão mineral reforçam a relevância ambiental e tecnológica da cinza pesada gerada na cadeia carbonífera de Candiota-RS. A combinação entre elevado teor de cinzas e poder calorífico moderado a baixo evidencia que parcela significativa do material alimentado ao processo térmico permanece como resíduo mineral, justificando a investigação de rotas de aproveitamento para esse resíduo, especialmente em aplicações de maior valor agregado, como matrizes geopoliméricas à base de metacaulim.

5.2 Preparo físico e classificação granulométrica da cinza pesada

Após a caracterização complementar do carvão mineral de partida, a discussão passa a considerar a cinza pesada obtida como resíduo mineral associado à combustão. A Tabela 7 apresenta a distribuição granulométrica do material recebido, utilizada para avaliar a heterogeneidade física da amostra e subsidiar a seleção da fração empregada nas formulações geopoliméricas.

Tabela 7 - Distribuição granulométrica da cinza pesada

Faixa Tyler	Faixa de abertura	Diâmetro médio	Massa retida	Retida	Passante acumulada
	(mm)	(mm)	(g)	(%)	(%)
-4+8	4,699–2,362	3,5305	311,40	27,57	72,43
-8+14	2,362–1,168	1,7650	102,93	9,11	63,31
-14+28	1,168–0,589	0,8785	130,84	11,59	51,73
-28+60	0,589–0,248	0,4185	258,17	22,86	28,87
-60+100	0,248–0,147	0,1975	122,03	10,81	18,06
-100+115	0,147-0,124	0,1355	56,77	5,03	13,03
-115	<0,124	-	147,21	13,03	0,00
Total	-	-	1129,35	100,0	-

Fonte: Autor (2026).

Os resultados indicam que a cinza pesada apresentou distribuição granulométrica ampla, com partículas desde dimensões superiores a 2 mm até frações inferiores a 0,124 mm. As maiores retenções ocorreram nas faixas de 4,699 a 2,362 mm e de 0,589 a 0,248 mm, correspondentes às frações Tyler -4+8 e -28+60, respectivamente. Essas duas faixas representaram 27,57% e 22,86% da massa analisada, evidenciando a presença expressiva de partículas grosseiras na amostra integral.

A fração passante na peneira nº 60, correspondente a partículas inferiores a 0,248 mm, representou 28,87% da massa total. Consequentemente, 71,13% da cinza pesada permaneceu retida em faixas superiores a 0,248 mm. Esse resultado mostra que o uso do resíduo sem separação granulométrica poderia aumentar a heterogeneidade das pastas geopoliméricas, favorecendo sua atuação como material granular ou de preenchimento, em vez de promover uma incorporação mais uniforme à matriz ligante à base de metacaulim.

Esse comportamento é compatível com o reportado na literatura para cinzas pesadas de carvão. Menda *et al.* (2025) descrevem a cinza pesada como um material de textura angular, irregular, porosa e rugosa, com distribuição granulométrica que pode variar de areia fina a cascalho fino. De forma semelhante, Aygün, Bilir e Uysal (2024) destacam que esse resíduo apresenta elevada variabilidade física, incluindo

diferenças de granulometria, massa específica, absorção de água e módulo de finura, fatores que podem influenciar diretamente a trabalhabilidade, o empacotamento e o desempenho mecânico de matrizes cimentícias e geopoliméricas.

Para representar a distribuição granulométrica por meio de um parâmetro médio associado à relação entre o volume e a área superficial das partículas, estimou-se o diâmetro médio de Sauter, segundo Cremasco (2018), conforme a Equação (13).

$$D_{sauter} = \frac{1}{\sum(x_i/d_i)} \quad (13)$$

Fonte: Cremasco (2018).

em que D_{sauter} corresponde ao diâmetro médio de Sauter, x_i à fração mássica retida em cada intervalo granulométrico e d_i ao diâmetro médio da respectiva faixa de peneiramento. Considerando as classes granulométricas com diâmetro médio definido na Tabela 7, obteve-se diâmetro médio de Sauter estimado de 0,582 mm.

O valor de $D_{sauter} = 0,582$ mm confirma que a amostra integral de cinza pesada apresenta granulometria relativamente grosseira para aplicação direta como componente fino em sistemas geopoliméricos. Esse resultado reforça a importância da seleção da fração passante em 0,248 mm, uma vez que partículas menores tendem a apresentar maior área de contato com a solução ativadora alcalina e melhor dispersão na pasta. Em sistemas ativados alcalinamente, essa condição pode favorecer a interação física entre a cinza pesada, o metacaulim e o ativador, além de aumentar a possibilidade de dissolução de espécies silicoaluminosas presentes no resíduo.

A importância do controle granulométrico também é reforçada por Schackow *et al.* (2025), que observaram que a redução do tamanho de partículas por moagem pode aumentar a reatividade da cinza pesada e melhorar seu desempenho como material cimentício suplementar. Embora o presente Trabalho não tenha empregado moagem como etapa de ativação mecânica, o peneiramento permitiu selecionar uma fração mais fina e fisicamente mais uniforme, reduzindo a presença de partículas grosseiras nas formulações D05M10 e D10M10.

Em uma perspectiva de aplicação em maior escala, a fração correspondente aos 71,13% retidos acima de 0,248 mm não deve ser necessariamente considerada rejeito. Esse material pode ser submetido à moagem, visando à redução do tamanho

das partículas e ao aumento da área superficial, para posterior avaliação em matrizes geopoliméricas. Alternativamente, a fração mais grosseira pode ser direcionada a aplicações de menor exigência reativa, nas quais atue predominantemente como material granular ou de preenchimento, como em pavimentação, estabilização de solos, materiais cerâmicos e agregados. Dessa forma, o aproveitamento integral da cinza pesada pode envolver a combinação de diferentes rotas tecnológicas, evitando a geração de uma nova corrente residual.

Assim, a classificação granulométrica demonstrou que a cinza pesada de Candiota-RS apresenta comportamento típico desse tipo de resíduo, material granular, heterogêneo e com ampla distribuição de tamanho de partículas. Ao mesmo tempo, os resultados justificam tecnicamente o preparo físico adotado, pois a seleção da fração passante em 0,248 mm tornou o material mais adequado à incorporação em matrizes geopoliméricas à base de metacaulim e fornece base para interpretar, posteriormente, o desempenho mecânico das formulações produzidas.

5.3 Caracterização química dos materiais por fluorescência de raios X

A composição química dos materiais utilizados nas formulações geopoliméricas, determinada por Fluorescência de raios X (FRX), é apresentada na Tabela 8. Foram avaliados a fonte silicatada obtida a partir da evaporação da solução comercial Sicol 30, o metacaulim e a cinza pesada. A apresentação conjunta desses resultados permite comparar a função química de cada material no sistema geopolimérico.

Tabela 8 - Perfil químico dos materiais geopoliméricos

(continua)			
Componente	Fonte silicatada (%)	Metacaulim (%)	Cinza pesada (%)
Na ₂ O	1,208	0,046	0,255
MgO	0,042	0,312	7,886
Al ₂ O ₃	0,816	36,861	10,784
SiO ₂	78,127	54,321	40,900
SO ₃	0,042	0,710	12,727
K ₂ O	0,022	1,731	1,615

Tabela 8 - Perfil químico dos materiais geopoliméricos

			(conclusão)
CaO	0,096	0,467	18,781
TiO ₂	0,020	1,691	0,370
Fe ₂ O ₃	0,058	2,147	4,790
CO ₂	19,530	1,340	1,790

Fonte: Autor (2026).

A fonte silicatada obtida a partir da evaporação da solução comercial Sicol 30 apresentou predominância de SiO₂, com teor de 78,127%, e baixo teor de Al₂O₃, correspondente a 0,816%. Esse resultado confirma que esse material atua principalmente como fonte complementar de sílica, contribuindo para o ajuste da relação molar Si/Al das formulações geopoliméricas. O teor de 19,530% reportado na forma de CO₂ para a fonte silicatada pode estar relacionado à presença de espécies carbonatadas formadas durante o período de armazenamento da solução precursora. Soluções alcalinas contendo espécies solúveis de silício podem interagir gradualmente com o dióxido de carbono atmosférico, favorecendo a formação de carbonatos. Durante o tratamento térmico realizado a 85 °C por aproximadamente 5 h, a remoção da água pode ter promovido a concentração e a coprecipitação dessas espécies juntamente com o material silicatado sólido. Essa interpretação deve ser considerada uma hipótese, uma vez que a análise composicional isolada não permite determinar diretamente o mecanismo de formação dos compostos carbonatados (Davidovits, 2020; Provis; Van Deventer, 2014).

O metacaulim apresentou composição típica de precursor aluminossilicático, com 54,321% de SiO₂ e 36,861% de Al₂O₃. A soma desses dois óxidos corresponde a 91,182% da composição reportada, confirmando a predominância de silício e alumínio no material. Esse comportamento é coerente com a literatura sobre geopolímeros à base de metacaulim, na qual esse precursor é amplamente utilizado devido à sua elevada disponibilidade de espécies aluminossilicáticas e à sua maior reatividade em meio alcalino quando comparado a resíduos minerais de menor grau de ativação, como a cinza pesada (Huang; Wang, 2024; Jiang *et al.*, 2024).

A cinza pesada apresentou composição química distinta daquela observada para o metacaulim. O principal óxido identificado foi o SiO₂, com teor de 40,900%,

seguido por CaO, com 18,781%, SO₃, com 12,727%, Al₂O₃, com 10,784%, MgO, com 7,886%, e Fe₂O₃, com 4,790%. A soma de SiO₂ e Al₂O₃ corresponde a 51,684%, enquanto a soma de SiO₂, Al₂O₃ e Fe₂O₃ corresponde a 56,474%. Esses valores confirmam que a cinza pesada possui caráter silicoaluminoso, porém com composição mais complexa do que a de um precursor aluminosilicático convencional.

Quando comparada à literatura, a cinza pesada avaliada neste Trabalho apresenta comportamento compatível com a elevada variabilidade química atribuída a esse tipo de resíduo. Aygün, Bilir e Uysal (2024) destacam que a composição da *coal bottom ash* depende da origem do carvão, das condições de combustão e dos sistemas de coleta e controle ambiental, podendo apresentar variações expressivas nos teores de SiO₂, Al₂O₃, Fe₂O₃, CaO, MgO e SO₃. Dessa forma, a diferença entre a cinza de Candiota-RS e outras cinzas pesadas reportadas na literatura não deve ser interpretada como inconsistência, mas como reflexo da natureza regional e operacional do resíduo.

A comparação com Ku Meh *et al.* (2022) reforça essa interpretação. Os autores avaliaram uma cinza pesada proveniente da Usina de Manjung, na Malásia, e reportaram teores de 26,40% de SiO₂, 10,83% de Al₂O₃, 18,30% de Fe₂O₃ e 11,18% de CaO. Em relação a esse estudo, a cinza pesada de Candiota-RS apresentou teor superior de SiO₂, valor muito próximo de Al₂O₃, menor teor de Fe₂O₃ e maior teor de CaO. Essa comparação evidencia que, embora ambas as cinzas apresentem constituintes de interesse para sistemas cimentícios e geopoliméricos, suas composições químicas indicam comportamentos potenciais distintos.

O teor de Al₂O₃ da cinza pesada deste Trabalho, igual a 10,784%, foi bastante próximo ao valor reportado por Ku Meh *et al.* (2022), de 10,83%, indicando contribuição alumínica semelhante entre os materiais. No entanto, o teor de SiO₂ foi mais elevado na cinza de Candiota-RS, enquanto o teor de Fe₂O₃ foi consideravelmente menor. Essa diferença é relevante porque o silício e o alumínio são os principais constituintes associados à formação da rede geopolimérica, enquanto o ferro pode estar relacionado a fases menos diretamente envolvidas na formação do gel aluminosilicático principal.

O teor de CaO da cinza pesada de Candiota-RS, correspondente a 18,781%, também merece destaque. Esse valor é superior ao reportado por Ku Meh *et al.* (2022), de 11,18%, e indica uma contribuição cálcica expressiva. Em sistemas

geopoliméricos à base de metacaulim, nos quais tende a predominar a formação de gel N-A-S-H, a presença de cálcio pode modificar o sistema reacional e favorecer a formação de produtos adicionais ou coexistentes, como C-S-H, C-A-S-H ou C-(N)-A-S-H, dependendo da disponibilidade do cálcio, da alcalinidade e da forma estrutural em que esse elemento se encontra.

A presença expressiva de enxofre, reportado pela análise de FRX na forma equivalente de SO_3 , com teor de 12,727%, distingue a cinza pesada de Candiota-RS das composições frequentemente relatadas para esse resíduo, nas quais SiO_2 e Al_2O_3 constituem os óxidos majoritários, enquanto o SO_3 geralmente ocorre em menores proporções (Aygün; Bilir; Uysal, 2024). Esse teor pode estar associado a compostos sulfatados presentes no material, os quais podem ter origem no carvão de partida, nas condições de combustão ou em interações com sistemas de controle ambiental. Em matrizes ativadas alcalinamente, a presença de sulfatos pode influenciar a formação de fases secundárias e o equilíbrio químico do sistema, embora a FRX não permita identificar diretamente quais fases sulfatadas estão presentes.

Nesse sentido, a FRX fornece uma informação fundamental, mas limitada, ela indica a composição química global dos materiais na forma de óxidos, porém não permite afirmar isoladamente a forma mineralógica, o grau de amorfismo ou a disponibilidade reativa desses constituintes. Assim, embora a cinza pesada apresente teores relevantes de SiO_2 e Al_2O_3 , parte desses óxidos pode estar associada a fases cristalinas ou estruturas pouco solúveis em meio alcalino. Essa limitação é importante porque a reatividade de materiais aluminosilicáticos em sistemas alcalinos depende não apenas da composição química, mas também da estrutura e da disponibilidade das espécies presentes (Gong; White, 2023).

Essa interpretação também é coerente com Ju *et al.* (2023), que investigaram o uso de cinza pesada em geopolímeros à base de metacaulim e observaram que a incorporação convencional da cinza pode prejudicar a resistência à compressão quando sua contribuição reativa é limitada. Os autores destacam que a cinza pesada pode apresentar baixa reatividade quando utilizada diretamente, o que reforça a necessidade de avaliar sua composição, seu tratamento prévio e sua forma de incorporação na matriz geopolimérica.

De forma complementar, Ghanim *et al.* (2025) investigaram a produção de silicato de sódio a partir de cinza pesada, reforçando que esse resíduo pode apresentar potencial como fonte alternativa de sílica em sistemas geopoliméricos. No

entanto, esse aproveitamento depende da disponibilidade química da sílica e das condições de extração ou ativação. Essa observação é relevante para o presente Trabalho porque a cinza de Candiota-RS apresentou teor considerável de SiO_2 , mas sua utilização foi adotada como incorporação parcial à matriz, e não como fonte principal de ativador silicatado.

A comparação entre os três materiais avaliados por FRX sustenta a estratégia de formulação adotada neste Trabalho. A fonte silicatada apresenta predominância de SiO_2 e atua como componente auxiliar para ajuste da relação Si/Al; o metacaulim apresenta elevada soma de SiO_2 e Al_2O_3 , justificando sua função como precursor aluminosilicático principal; e a cinza pesada apresenta caráter silicoaluminoso, porém associado a teores relevantes de CaO, SO_3 , MgO e Fe_2O_3 , indicando comportamento químico mais complexo.

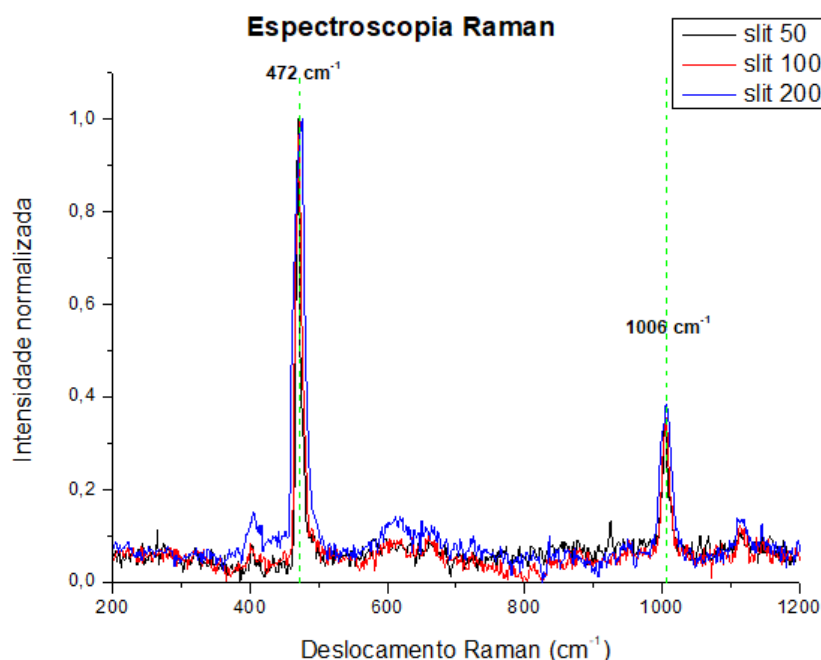
Dessa forma, os resultados de FRX demonstram que a cinza pesada de Candiota-RS possui composição compatível com sua investigação em sistemas ativados alcalinamente, mas não suficiente para tratá-la como substituto integral do metacaulim. Sua composição justifica a incorporação parcial nas formulações D05M10 e D10M10, permitindo avaliar se o resíduo contribui para a matriz geopolimérica por efeito químico, físico ou pela combinação de ambos. Essa interpretação será complementada pela caracterização estrutural por espectroscopia Raman e, posteriormente, pelos resultados de resistência à compressão.

5.4 Caracterização da cinza pesada por espectroscopia Raman

Após a caracterização química dos materiais por fluorescência de raios X, a espectroscopia Raman foi utilizada como técnica complementar para avaliar aspectos estruturais da cinza pesada de Candiota-RS. Enquanto a FRX permitiu identificar a composição global do resíduo na forma de óxidos, a análise Raman forneceu informações associadas às vibrações moleculares e à organização estrutural de espécies presentes no material.

A Figura 18 apresenta os espectros Raman normalizados da cinza pesada obtidos nas configurações instrumentais de *slit* 50, 100 e 200. A normalização das intensidades permitiu comparar o perfil espectral das três aquisições, com foco na posição e na reprodutibilidade das principais bandas observadas.

Figura 18 - Resposta Raman da cinza pesada em diferentes aberturas



Fonte: Autor (2026).

Observa-se que os três espectros apresentaram comportamento semelhante, com duas bandas principais localizadas em aproximadamente 472 cm^{-1} e 1006 cm^{-1} . A repetição dessas bandas nas três configurações avaliadas indica boa reprodutibilidade do perfil espectral e sugere que esses sinais estão associados a constituintes efetivamente presentes na amostra, e não apenas a ruídos ou artefatos instrumentais. Entre as configurações avaliadas, o espectro obtido com *slit* 200 apresentou maior oscilação da linha de base e sinais secundários mais pronunciados, enquanto os espectros obtidos com *slit* 50 e 100 apresentaram perfil mais limpo. Ainda assim, como as principais bandas foram coincidentes nas três condições, a interpretação foi conduzida considerando os sinais comuns observados no conjunto de espectros.

O Quadro 1 apresenta as principais bandas observadas no espectro Raman da cinza pesada e suas atribuições prováveis, com base na comparação com dados reportados na literatura para cinzas de combustão, materiais silicatados e espécies sulfatadas.

Quadro 1 - Principais bandas Raman observadas na cinza pesada

Banda observada (cm ⁻¹)	Atribuição	Interpretação
472	Vibrações associadas a ligações Si–O, Si–O–Si e/ou Si–O–Al em estruturas silicatadas ou aluminossilicáticas	Indica contribuição de espécies ricas em silício, compatível com o teor de SiO ₂ observado por FRX
1006	Estiramento simétrico S–O de grupos sulfato, possivelmente associado a sulfatos de cálcio; pode haver contribuição de unidades silicatadas em região espectral próxima	Indica possível presença de espécies sulfatadas, coerente com os teores elevados de SO ₃ e CaO observados por FRX

Fonte: Elaborado pelo autor com base em Lv *et al.* (2025) e Samouh *et al.* (2023).

A banda mais intensa observada em aproximadamente 472 cm⁻¹ pode ser atribuída a vibrações associadas a ligações Si–O em estruturas silicatadas ou aluminossilicáticas. Essa interpretação é coerente com a composição química da cinza pesada, que apresentou SiO₂ como principal óxido na análise de FRX. Em estudos com cinzas volantes de origem termelétrica, Lv *et al.* (2025) observaram picos Raman em torno de 468–471 cm⁻¹ e os associaram a vibrações de oxigênio de ponte em estruturas Si–O–Si, Si–O–Al e Al–O–Al. De forma semelhante, o sinal em 472 cm⁻¹ observado neste Trabalho indica a presença de espécies silicatadas estruturalmente organizadas na cinza pesada.

A presença dessa banda também está de acordo com a natureza esperada para resíduos da combustão do carvão, nos quais o silício pode ocorrer tanto em estruturas cristalinas mais ordenadas quanto em fases amorfas ou vítreas. Entretanto, a espectroscopia Raman, isoladamente, não permite quantificar a fração amorfa nem confirmar de forma definitiva a fase mineral responsável pelo sinal. Por isso, a banda em 472 cm⁻¹ deve ser interpretada como evidência de estruturas silicatadas ou aluminossilicáticas presentes no resíduo, e não como identificação mineralógica exclusiva.

A segunda banda de destaque foi observada em aproximadamente 1006 cm^{-1} . Esse sinal pode estar associado ao estiramento simétrico S–O de grupos sulfato, especialmente em espécies sulfatadas de cálcio. Essa atribuição é compatível com a composição química da cinza pesada determinada por FRX, que indicou teores expressivos de SO_3 e CaO. Samouh *et al.* (2023), ao avaliarem cinzas de combustão por espectroscopia Raman, reportaram picos próximos de $1011\text{--}1017\text{ cm}^{-1}$ associados a sulfatos de cálcio. Assim, a banda em 1006 cm^{-1} observada neste Trabalho sugere a presença de espécies sulfatadas no resíduo, possivelmente relacionadas à composição do carvão de partida, às condições de combustão ou a interações com sistemas de controle ambiental.

Embora a atribuição da banda em 1006 cm^{-1} a grupos sulfato seja coerente com os resultados de FRX, essa região espectral também pode apresentar contribuições de unidades silicatadas, dependendo da composição e do grau de organização estrutural do material. Por esse motivo, a interpretação foi conduzida de forma cautelosa, considerando a banda como indicativo de espécies sulfatadas e/ou estruturas silicatadas em região próxima, sem atribuição exclusiva a uma única fase mineral.

A presença simultânea das bandas em 472 cm^{-1} e 1006 cm^{-1} reforça a complexidade estrutural da cinza pesada de Candiota–RS. A primeira banda está relacionada ao caráter silicatado do resíduo, enquanto a segunda é compatível com a presença de espécies sulfatadas, em concordância com a composição química obtida por FRX. Essa combinação indica que a cinza pesada não deve ser interpretada apenas como material silicoaluminoso simples, mas como um resíduo de composição mista, contendo espécies associadas a silício, cálcio e enxofre.

Do ponto de vista da aplicação em geopolímeros, esses resultados são relevantes porque a reatividade da cinza pesada não depende apenas dos teores globais de SiO_2 e Al_2O_3 , mas também da forma estrutural em que esses constituintes se encontram. A presença de bandas estreitas e bem definidas sugere a existência de espécies com certo grau de organização estrutural, o que pode estar associado a menor disponibilidade reativa em meio alcalino quando comparada a precursores mais desordenados, como o metacaulim. Assim, a espectroscopia Raman contribui para explicar por que a cinza pesada foi avaliada como componente parcial nas formulações D05M10 e D10M10, e não como substituto integral do precursor aluminosilicático principal.

Dessa forma, a espectroscopia Raman complementou os resultados de FRX ao fornecer evidências estruturais associadas às espécies presentes na cinza pesada. A banda em 472 cm^{-1} reforça o caráter silicatado do resíduo, enquanto a banda em 1006 cm^{-1} é compatível com a presença de espécies sulfatadas, em concordância com os teores de SO_3 e CaO observados na análise química. No entanto, a técnica foi empregada como ferramenta complementar de interpretação estrutural, não substituindo uma identificação mineralógica direta por difração de raios X. Assim, os resultados Raman devem ser analisados em conjunto com a composição química, a granulometria e, posteriormente, com o desempenho mecânico das formulações geopoliméricas produzidas.

5.5 Resistência à compressão das matrizes geopoliméricas

A resistência à compressão das matrizes geopoliméricas foi avaliada nos laboratórios da Universidade Federal do Pampa (UNIPAMPA), Campus Bagé, utilizando uma máquina universal de ensaios eletromecânica da marca EMIC, modelo DL 20000, com capacidade máxima de 100 kN, apresentada na Figura 19. Os resultados foram analisados comparativamente entre a formulação de referência, RefM10, e as formulações contendo 5% e 10% de cinza pesada, denominadas D05M10 e D10M10, respectivamente.

Figura 19 - Máquina universal de ensaios EMIC DL 20000



Fonte: Autor (2026).

As Tabelas 9 e 10 apresentam os resultados obtidos aos 7 e 14 dias de cura. A força máxima registrada no ensaio foi fornecida pelo equipamento em kgf e convertida para newtons para o cálculo da resistência à compressão. A área resistente foi determinada a partir do diâmetro real medido em cada corpo de prova, conforme descrito na metodologia.

Tabela 9 - Resistência à compressão das formulações aos 7 dias

Formulação	Diâmetro (mm)	Altura (mm)	Força (kN)	Resistência à compressão (MPa)
RefM10	37,58	82,44	14,32	12,91
D05M10	37,05	83,23	19,65	18,22
D10M10	36,53	83,23	12,71	12,12

Fonte: Autor (2026).

Tabela 10 - Resistência à compressão das formulações aos 14 dias

Formulação	Diâmetro (mm)	Altura (mm)	Força (kN)	Resistência à compressão (MPa)
RefM10	37,36	82,98	16,89	15,41
D05M10	36,58	84,22	19,54	18,59
D10M10	36,89	84,08	16,36	15,30

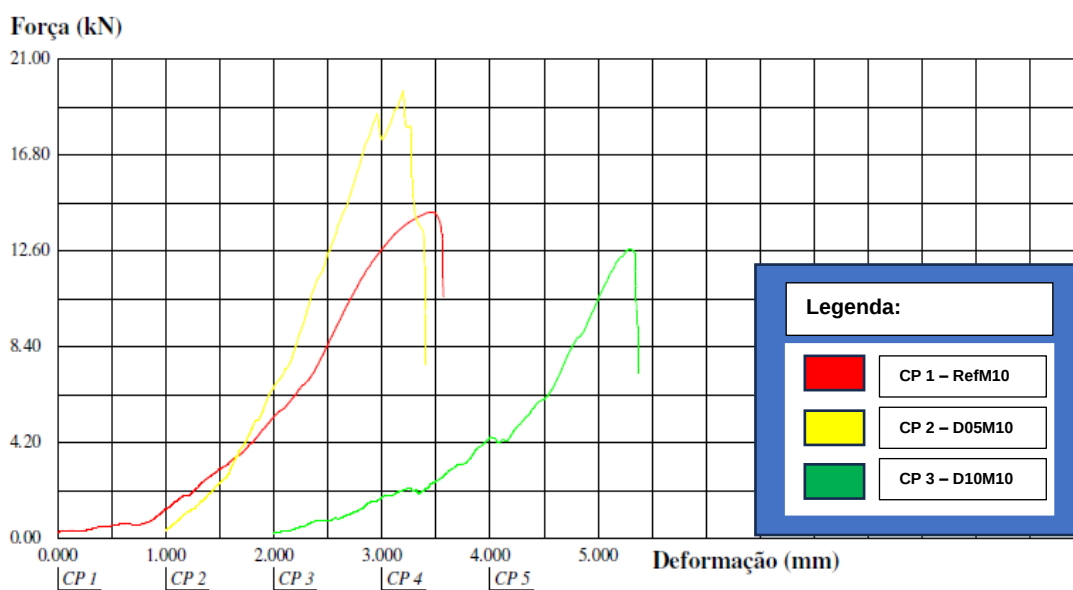
Fonte: Autor (2026).

Os valores obtidos devem ser interpretados como resultados comparativos do desempenho mecânico das formulações, e não como comprovação de atendimento à ABNT NBR 5739:2018 ou à ASTM C39/C39M-24. Essas normas orientaram os princípios gerais do ensaio, porém são destinadas a corpos de prova de concreto e não estabelecem valores mínimos de resistência para matrizes geopoliméricas. Além disso, as dimensões reduzidas dos corpos de prova, as adaptações realizadas na moldagem e o número limitado de amostras impedem o enquadramento normativo e a determinação da resistência característica.

Apesar dessas limitações, as resistências obtidas, entre 12,12 e 18,59 MPa, demonstram a formação de matrizes endurecidas capazes de suportar carregamentos compressivos. Esses resultados indicam potencial para estudos posteriores voltados a aplicações de menor exigência estrutural, como elementos não estruturais, materiais de preenchimento, artefatos para pavimentação e componentes construtivos de baixa solicitação. A definição de uma aplicação específica, entretanto, depende da realização de novos ensaios, do aumento do número de réplicas, da avaliação em idades mais avançadas e do atendimento às normas próprias do produto considerado.

A Figura 20 apresenta as curvas de força em função da deformação obtidas nos ensaios de compressão aos 7 dias de cura. A representação gráfica complementa os dados da Tabela 9 e permite visualizar a resposta das formulações durante o carregamento, evidenciando as diferenças de comportamento mecânico entre a matriz de referência e as formulações contendo cinza pesada.

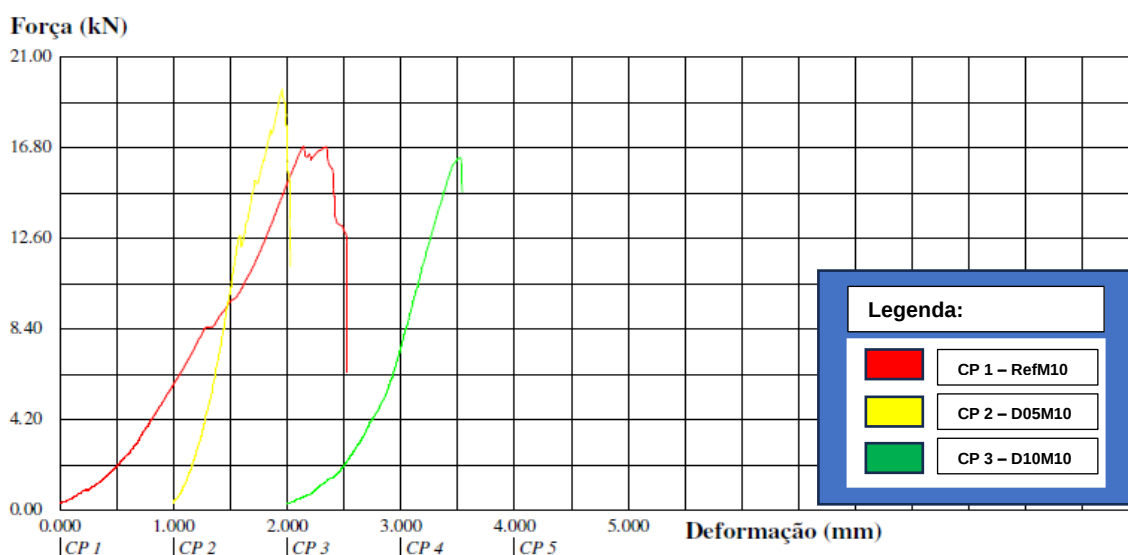
Figura 20 - Curvas força-deformação aos 7 dias



Fonte: Autor (2026).

A Figura 21 apresenta as curvas de força em função da deformação obtidas aos 14 dias de cura. Em conjunto com a Figura 20, esse gráfico permite comparar qualitativamente a evolução da resposta mecânica das formulações com o avanço do tempo de cura, especialmente em relação ao aumento de resistência observado para RefM10 e D10M10.

Figura 21 - Curvas força-deformação aos 14 dias



Fonte: Autor (2026).

A análise conjunta das Tabelas 9 e 10 e das Figuras 20 e 21 indica que a incorporação da cinza pesada influenciou não apenas o valor final de resistência à compressão, mas também o ritmo de desenvolvimento mecânico das formulações. A formulação D05M10 manteve o melhor desempenho nas duas idades avaliadas, sugerindo que a incorporação de 5% de cinza pesada favoreceu a formação de uma matriz mais resistente já nas primeiras idades de cura.

Esse comportamento pode estar associado ao equilíbrio entre dois efeitos. O primeiro é a manutenção do metacaulim como precursor aluminosilicático predominante, garantindo disponibilidade de espécies reativas para a formação da matriz geopolimérica. O segundo é a possível contribuição física da fração fina da cinza pesada, que pode ter atuado no preenchimento de vazios, no empacotamento das partículas e na densificação local da pasta endurecida. Assim, em baixo teor, a cinza pesada parece ter contribuído positivamente sem comprometer de forma significativa a formação da matriz ligante.

A formulação D10M10 apresentou comportamento distinto. Embora tenha exibido menor desempenho inicial, sua resistência à compressão evoluiu de forma mais evidente entre 7 e 14 dias, aproximando-se da matriz de referência. Esse resultado sugere que o aumento do teor de cinza pesada pode ter retardado o

desenvolvimento inicial da resistência, possivelmente pela substituição de parte do metacaulim por um resíduo de menor reatividade. Entretanto, a evolução observada aos 14 dias indica que essa formulação continuou desenvolvendo estrutura resistente ao longo do tempo de cura.

Essa diferença de comportamento entre D05M10 e D10M10 é importante porque pode indicar que o efeito da cinza pesada não foi simplesmente proporcional ao teor incorporado. A adição de 5% favoreceu o desempenho mecânico inicial, enquanto o teor de 10% parece ter imposto maior limitação inicial à matriz, ainda que com recuperação parcial ao longo da cura. Portanto, os resultados apontam para a existência de uma faixa de incorporação mais favorável, na qual o resíduo contribui para a matriz sem reduzir excessivamente a participação do precursor mais reativo.

A interpretação desse comportamento deve ser feita em conjunto com as caracterizações da cinza pesada. A classificação granulométrica mostrou que o resíduo possui natureza física heterogênea, exigindo seleção da fração fina para sua incorporação nas formulações. A FRX indicou caráter silicoaluminoso, mas também composição química mista, com presença relevante de CaO , SO_3 , MgO e Fe_2O_3 . A espectroscopia Raman, por sua vez, indicou prováveis sinais associados a espécies silicatadas e sulfatadas. Assim, a cinza pesada não deve ser interpretada como substituto direto do metacaulim, mas como componente parcial cuja contribuição depende do equilíbrio entre efeito físico, composição química e disponibilidade reativa.

Esse comportamento está de acordo com discussões recentes sobre o uso de cinza pesada em sistemas cimentícios e geopoliméricos. Ju *et al.* (2023) destacam que a incorporação convencional de coal bottom ash em geopolímeros à base de metacaulim pode limitar a resistência quando a contribuição reativa da cinza é baixa. Bheel *et al.* (2024) observaram que baixos teores de CBA e metacaulim podem favorecer propriedades mecânicas em sistemas geopoliméricos, enquanto teores mais elevados podem prejudicar o desempenho. De forma complementar, Schackow *et al.* (2025) reforçam que a reatividade da cinza pesada depende fortemente do controle granulométrico e da moagem, uma vez que partículas mais finas tendem a apresentar maior contribuição em matrizes cimentícias e ativadas alcalinamente.

O Quadro 2 apresenta uma síntese comparativa entre a tendência observada neste Trabalho e estudos recentes envolvendo cinza pesada em sistemas cimentícios ou geopoliméricos.

Quadro 2 - Efeito da cinza pesada em matrizes ligantes

(continua)

Fonte	Sistema avaliado	Tendência reportada	Relação
Este Trabalho	Geopolímeros à base de metacaulim com 0%, 5% e 10% de cinza pesada.	D05M10 apresentou maior resistência aos 7 e 14 dias; D10M10 teve menor desempenho inicial, mas maior ganho relativo entre 7 e 14 dias	Indica efeito positivo em baixo teor e possível desenvolvimento mais lento em maior teor de cinza
Ju <i>et al.</i> (2023)	Geopolímeros à base de metacaulim com cinza pesada	A incorporação convencional de CBA pode reduzir a resistência devido à baixa reatividade da cinza; o tratamento alcalino da CBA melhora seu aproveitamento	Ajuda a explicar o desempenho inicial inferior de D10M10 e a necessidade de controle do teor incorporado.
Bheel <i>et al.</i> (2024)	Concreto geopolimérico autoadensável com CBA e metacaulim substituindo GGBFS	Baixos teores podem melhorar propriedades mecânicas, enquanto teores elevados podem reduzir o desempenho	Sustenta a interpretação de que D05M10 atingiu melhor equilíbrio entre preenchimento físico e manutenção da matriz reativa.
Schackow <i>et al.</i> (2025)	Cinza pesada moída como material cimentício suplementar	A reatividade da CBA aumenta com moagem e controle granulométrico	Reforça que a cinza deste Trabalho, apenas peneirada, pode atuar mais como preenchimento físico do que como precursor altamente reativo
Aygün, Bilir e Uysal (2024)	Revisão sobre uso de CBA em materiais cimentícios e geopoliméricos	O desempenho depende da composição química, granulometria, absorção de água e teor incorporado	Reforça a necessidade de avaliar a cinza pesada de Candiota-RS de forma específica

Quadro 2 - Efeito da cinza pesada em matrizes ligantes

(conclusão)			
Alosta <i>et al.</i> (2024)	Concreto com substituição parcial por CBA tratada	O teor ótimo depende do tratamento da cinza, da matriz e da idade de cura	Mostra que não há teor ótimo universal para CBA, justificando a comparação entre 5% e 10% neste Trabalho

Fonte: Autor (2026).

Além da comparação quanto à tendência de comportamento das formulações com cinza pesada, torna-se importante posicionar o melhor resultado obtido neste Trabalho em relação a outros sistemas geopoliméricos e cimentícios reportados na literatura. Para isso, a Tabela 11 apresenta uma comparação entre a resistência à compressão da formulação D05M10, que apresentou o maior desempenho neste estudo, e valores reportados para diferentes materiais contendo cinza pesada ou precursores aluminosilicáticos.

Tabela 11 - Comparação da resistência à compressão

(continua)				
Fonte	Sistema avaliado	Idade de cura	Resistência à compressão	Relação com esse Trabalho
Este Trabalho	Pasta geopolimérica à base de metacaulim com 5% de cinza pesada, formulação D05M10	14 dias	18,59 MPa	Melhor desempenho obtido neste estudo, indicando potencial da incorporação de baixo teor de cinza pesada.
Bheel <i>et al.</i> (2024)	Concreto geopolimérico autoadensável com GGBFS, CBA e metacaulim	28 dias	59,40 MPa para a mistura 5CBA5MK	Mostra que sistemas geopoliméricos otimizados, com escória e cura adequada, podem atingir resistências superiores.

Tabela 11 - Comparação da resistência à compressão

				(conclusão)
Menda et al. (2025)	Concreto com substituição parcial de agregado miúdo por CBA	7, 28 e 56 dias	29, 34 e 31 MPa para mistura com 50% de CBA	Indica que a CBA pode apresentar bom desempenho quando atua como agregado em matriz cimentícia.
Alosta et al. (2024)	Concreto com substituição parcial por CBA tratada	56 dias	Melhor desempenho com 10% de CBA tratada, com aumento de aproximadamente 2% em relação ao controle	Mostra que o tratamento da cinza e a idade de cura influenciam diretamente o desempenho.
Wallah et al. (2025)	Geopolímeros à base de caulim, com cura ambiente e cura térmica	7 e 28 dias	5,3–19,6 MPa aos 7 dias e 9,5–22,2 MPa aos 28 dias	Demonstra que geopolímeros de base argilosa podem apresentar resistências próximas às deste Trabalho quando não otimizados para alto desempenho.
ABNT NBR 8953	Concreto para fins estruturais	28 dias	Classes estruturais usuais a partir de 20 MPa	Utilizada apenas como referência contextual, pois este Trabalho avaliou pastas geopoliméricas, não concreto estrutural

Fonte: Autor (2026).

A comparação apresentada na Tabela 11 deve ser interpretada de forma contextual, uma vez que os sistemas avaliados na literatura diferem quanto ao tipo de matriz, idade de cura, função da cinza pesada, presença de agregados, uso de escória, tratamento do resíduo e condições de ativação. Ainda assim, essa comparação permite situar a formulação D05M10 em relação à ordem de grandeza de resistência observada em outros materiais geopoliméricos e cimentícios.

Observa-se que o melhor resultado deste Trabalho permanece inferior aos valores reportados para sistemas geopoliméricos otimizados com escória, como os avaliados por Bheel *et al.* (2024). Essa diferença é esperada, pois a escória granulada de alto-forno é um precursor de elevada reatividade e rico em cálcio, favorecendo a formação de produtos cimentantes adicionais e resistências mais elevadas. No presente estudo, por outro lado, avaliou-se uma pasta geopolimérica à base de metacaulim com cinza pesada apenas peneirada, sem moagem, tratamento térmico ou ativação alcalina prévia específica.

Por outro lado, quando comparado a geopolímeros de base argilosa não otimizados para alto desempenho, o resultado obtido para D05M10 mostra-se compatível com faixas reportadas na literatura. Essa comparação é mais adequada do que uma equivalência direta com concretos estruturais, pois o presente Trabalho avaliou pastas geopoliméricas em escala laboratorial, sem agregados graúdos ou miúdos e com apenas um corpo de prova por formulação em cada idade de cura.

A comparação com concretos contendo cinza pesada também deve ser feita com cautela. Em muitos desses estudos, a CBA atua principalmente como agregado ou substituinte parcial em matriz cimentícia, enquanto neste Trabalho foi incorporada como componente da fase sólida de uma pasta ativada alcalinamente. Portanto, as diferenças de desempenho não devem ser atribuídas apenas à natureza da cinza, mas também à função exercida pelo resíduo em cada sistema, ao tipo de matriz, à idade de cura e aos tratamentos aplicados.

Dessa forma, os resultados indicam que a incorporação de 5% de cinza pesada apresentou o comportamento mais promissor entre as formulações avaliadas, mantendo o maior desempenho aos 7 e 14 dias. A formulação com 10% de cinza pesada, embora tenha apresentado menor resistência inicial, demonstrou aumento da resistência com o avanço da cura, aproximando-se da matriz de referência. Esses resultados sugerem que a cinza pesada de Candiota-RS pode ser utilizada como componente parcial em matrizes geopoliméricas à base de metacaulim,

especialmente em baixos teores, desde que sejam considerados o controle granulométrico, a composição química e a possível limitação reativa do resíduo.

Deve-se destacar que essa análise corresponde a uma avaliação exploratória, pois foi produzido apenas um corpo de prova por formulação em cada idade de cura. Portanto, os resultados não devem ser interpretados como diferenças estatisticamente significativas, mas como tendências iniciais de comportamento mecânico. Ainda assim, a evolução observada entre 7 e 14 dias fornece evidências relevantes para a discussão da viabilidade da cinza pesada de Candiota-RS como componente parcial em geopolímeros à base de metacaulim.

6 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Este Trabalho permitiu avaliar o uso da cinza pesada de Candiota-RS como componente parcial em formulações geopoliméricas à base de metacaulim, considerando a caracterização do resíduo e o desempenho mecânico das matrizes produzidas. Embora o planejamento inicial tenha contemplado a idade de 28 dias, a avaliação mecânica apresentada neste Trabalho foi delimitada às idades de 7 e 14 dias, permanecendo a análise em idade mais avançada como perspectiva de continuidade experimental.

Dentro do escopo experimental estabelecido, considera-se que o objetivo geral e os objetivos específicos propostos foram alcançados, uma vez que o carvão mineral de partida e a cinza pesada foram caracterizados, as formulações geopoliméricas foram produzidas e o desempenho mecânico inicial das matrizes foi avaliado nas idades de 7 e 14 dias.

A caracterização do carvão mineral de partida evidenciou elevada fração mineral, representada pelo teor de cinzas de 55,00%, confirmando a relevância da geração de resíduos sólidos associados à combustão desse material. Esse resultado reforça a importância de investigar alternativas de aproveitamento para resíduos da cadeia carbonífera regional.

A cinza pesada apresentou composição compatível com sua aplicação em sistemas ligantes ativados alcalinamente, principalmente pela presença de óxidos de silício e alumínio. Entretanto, os teores de cálcio, enxofre, magnésio e ferro indicaram que o resíduo possui composição mista, não podendo ser interpretado apenas como uma fonte silicoaluminosa simples. Essa constatação representa uma contribuição importante do Trabalho, pois demonstra que a cinza pesada de Candiota-RS deve ser avaliada a partir de suas características próprias antes de sua incorporação em matrizes geopoliméricas.

A espectroscopia Raman complementou a caracterização química ao indicar bandas associadas a espécies silicatadas e sulfatadas. Esses resultados reforçaram que a organização estrutural da cinza pesada influencia sua possível participação no processo de ativação alcalina, justificando sua utilização como componente parcial da matriz, e não como substituto integral do metacaulim.

As formulações produzidas demonstraram a viabilidade experimental preliminar da incorporação de cinza pesada nas condições estudadas. Entre os teores avaliados,

a formulação com 5% de cinza pesada apresentou o comportamento mais promissor, indicando maior compatibilidade entre o resíduo, o metacaulim e o sistema ativador utilizado. O aumento do teor de cinza para 10%, por outro lado, não favoreceu o desempenho mecânico nas condições avaliadas, sugerindo que a incorporação do resíduo deve ocorrer em baixos teores.

Dessa forma, conclui-se que a cinza pesada de Candiota-RS apresenta potencial de aproveitamento como componente parcial em geopolímeros à base de metacaulim, especialmente quando incorporada em baixo teor. A principal contribuição deste Trabalho está na avaliação experimental de um resíduo regional pouco explorado nessa aplicação, indicando uma rota promissora para sua valorização tecnológica e para o desenvolvimento de materiais ligantes alternativos com menor dependência de matérias-primas convencionais.

6.1 Sugestões para futuros trabalhos

Para trabalhos futuros, recomenda-se ampliar o número de corpos de prova por formulação, avaliar novas idades de cura, especialmente 28 dias, e investigar teores intermediários de incorporação de cinza pesada. Esses estudos permitiriam verificar com maior segurança a tendência de desempenho observada nas formulações avaliadas e definir faixas de incorporação mais adequadas para o resíduo. Recomenda-se também avaliar a moagem e o aproveitamento tecnológico da fração de cinza pesada retida acima de 0,248 mm, considerando sua reincorporação em matrizes geopoliméricas ou sua utilização como material granular em aplicações de menor exigência reativa.

Também se sugere aprofundar a avaliação das condições de moldagem e cura, considerando que essa etapa pode influenciar a perda de umidade, a integridade dos corpos de prova e o desenvolvimento da resistência mecânica. Nesse sentido, a comparação entre cura em temperatura ambiente, cura selada, cura em ambiente úmido e cura térmica controlada poderia contribuir para definir procedimentos mais adequados para matrizes geopoliméricas contendo cinza pesada.

Além disso, recomenda-se realizar caracterizações complementares, como difração de raios X, microscopia eletrônica de varredura, análise de porosidade e ensaios de durabilidade, a fim de compreender com maior profundidade a relação

entre a composição da cinza, a microestrutura formada e o desempenho mecânico das matrizes geopoliméricas.

REFERÊNCIAS

- ADAMS, T. Coal combustion products worldwide. **vgbe energy journal**, n. 9, p. 43-50, 2024. Disponível em: <https://www.vgbe.energy/wp-content/uploads/2024/11/vgbe-ej-2024-09-043-050-ADAMS-RGB-Specimen-Copy.pdf>. Acesso em: 6 maio 2026.
- ADE, M. V. B.; ARAÚJO, C. V.; RODRIGUES, C. F. A. (ed. científico). **Carvões gonduânicos no Brasil**. 1. ed. Porto: Edições Universidade Fernando Pessoa, 2019. 156 p. ISBN 978-989-643-153-2. Disponível em: <http://hdl.handle.net/10284/7735>. Acesso em: 14 jul. 2026.
- AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA. **Quantidade de usinas termelétricas por tipo**. Brasília, DF: ANEEL, 2026. Disponível em: <https://dadosabertos.aneel.gov.br/dataset/usinas-termeletricas-por-tipo>. Acesso em: 26 abr. 2026.
- ALOSTA, M. *et al.* Properties and microstructure of treated coal bottom ash as cement concrete replacement. **Civil Engineering Journal**, v. 10, n. 4, p. 1125-1144, 2024. DOI: 10.28991/CEJ-2024-010-04-08. Disponível em: <https://doi.org/10.28991/CEJ-2024-010-04-08>. Acesso em: 1 jul. 2026.
- ALVES, L. A. **Condicionantes institucionais à execução do investimento em infraestrutura no Brasil: o caso da UTE Candiota - fase III: relatório de pesquisa**. Brasília, DF: Ipea, 2017. Disponível em: <https://repositorio.ipea.gov.br/handle/11058/9920>. Acesso em: 26 abr. 2026.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 5738**: concreto: procedimento para moldagem e cura de corpos de prova. Rio de Janeiro: ABNT, 2015.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 5739**: concreto: ensaio de compressão de corpos de prova cilíndricos. Rio de Janeiro: ABNT, 2018.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 8953**: concreto para fins estruturais: classificação pela massa específica, por grupos de resistência e consistência. Rio de Janeiro: ABNT, 2015.
- ASTM INTERNATIONAL. **ASTM C39/C39M-24**: Standard Test Method for Compressive Strength of Cylindrical Concrete Specimens. West Conshohocken, PA: ASTM International, 2024. DOI: 10.1520/C0039_C0039M-24. Disponível em: https://store.astm.org/c0039_c0039m-24.html. Acesso em: 1 jul. 2026.
- ASTM INTERNATIONAL. **ASTM C136/C136M-25**: Standard Test Method for Sieve Analysis of Fine and Coarse Aggregates. West Conshohocken, PA: ASTM International, 2025. DOI: 10.1520/C0136_C0136M-25. Disponível em: https://store.astm.org/c0136_c0136m-25.html. Acesso em: 1 jul. 2026.
- ASTM INTERNATIONAL. **ASTM C470/C470M-23**: Standard Specification for Molds for Forming Concrete Test Cylinders Vertically. West Conshohocken, PA: ASTM

International, 2023. DOI: 10.1520/C0470_C0470M-23. Disponível em: https://store.astm.org/c0470_c0470m-23.html. Acesso em: 1 jul. 2026.

ASTM INTERNATIONAL. **ASTM D3172-13(2021)e1**: Standard Practice for Proximate Analysis of Coal and Coke. West Conshohocken, PA: ASTM International, 2021. DOI: 10.1520/D3172-13R21E01. Disponível em: <https://store.astm.org/d3172-13r21e01.html>. Acesso em: 28 abr. 2026.

ASTM INTERNATIONAL. **ASTM D3173-11(2019)**: Standard Test Method for Moisture in the Analysis Sample of Coal and Coke. West Conshohocken, PA: ASTM International, 2019. DOI: 10.1520/D3173-11R19. Disponível em: <https://store.astm.org/d3173-11r19.html>. Acesso em: 28 abr. 2026.

ASTM INTERNATIONAL. **ASTM D3174-12(2018)e1**: Standard Test Method for Ash in the Analysis Sample of Coal and Coke from Coal. West Conshohocken, PA: ASTM International, 2018. DOI: 10.1520/D3174-12R18E01. Disponível em: <https://store.astm.org/d3174-12r18e01.html>. Acesso em: 28 abr. 2026.

ASTM INTERNATIONAL. **ASTM D3175-20**: Standard Test Method for Volatile Matter in the Analysis Sample of Coal and Coke. West Conshohocken, PA: ASTM International, 2020. DOI: 10.1520/D3175-20. Disponível em: <https://store.astm.org/d3175-20.html>. Acesso em: 28 abr. 2026.

ASTM INTERNATIONAL. **ASTM D388-19a**: Standard Classification of Coals by Rank. West Conshohocken, PA: ASTM International, 2019. DOI: 10.1520/D0388-19A. Disponível em: <https://store.astm.org/d0388-19a.html>. Acesso em: 6 maio 2026.

ASTM INTERNATIONAL. **ASTM D4326-21**: Standard Test Method for Major and Minor Elements in Coal and Coke Ash by X-Ray Fluorescence. West Conshohocken, PA: ASTM International, 2021. DOI: 10.1520/D4326-21. Disponível em: <https://store.astm.org/d4326-21.html>. Acesso em: 1 jul. 2026.

ASTM INTERNATIONAL. **ASTM D5865/D5865M-19**: Standard Test Method for Gross Calorific Value of Coal and Coke. West Conshohocken, PA: ASTM International, 2019. DOI: 10.1520/D5865_D5865M-19. Disponível em: https://store.astm.org/d5865_d5865m-19.html. Acesso em: 6 maio 2026.

AYGÜN, B. F.; BILIR, T.; UYSAL, M. Coal bottom ash and its applications in cement and concrete technologies: a review. **Discover Civil Engineering**, v. 1, art. 86, 2024. DOI: 10.1007/s44290-024-00090-y. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s44290-024-00090-y>. Acesso em: 26 abr. 2026.

BENNEHALLI, B. *et al.* A review on the formation, recovery, and properties of coal fly ash (CFA)-derived microspheres for sustainable technologies and biomedical applications. **Next Materials**, v. 9, art. 101172, 2025. DOI: 10.1016/j.nxmate.2025.101172. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.nxmate.2025.101172>. Acesso em: 6 maio 2026.

BHEEL, N. *et al.* Enhancing performance and sustainability of GGBFS-based self-compacting geopolymer concrete blended with coal bottom ash and metakaolin by

using RSM modelling. **Scientific Reports**, v. 14, art. 19754, 2024. DOI: 10.1038/s41598-024-70800-0. Disponível em: <https://doi.org/10.1038/s41598-024-70800-0>. Acesso em: 26 abr. 2026.

BRASIL. Ministério de Minas e Energia. **Resenha energética brasileira 2025**. Brasília, DF: Ministério de Minas e Energia, 2025. Disponível em: <https://www.gov.br/mme/pt-br/assuntos/secretarias/sntep/publicacoes/resenha-energetica-brasileira/resenhas/reb-2025.pdf>. Acesso em: 6 maio 2026.

BRASIL. Ministério de Minas e Energia. **Portaria MME nº 913, de 15 de abril de 2026**. Fica aprovada a minuta de Contrato de Energia de Reserva da Usina Termelétrica Candiota III - CER-CAND3 em atendimento ao art. 3º-D da Lei nº 10.848, de 15 de março de 2004, incluído pela Lei nº 15.269, de 24 de novembro de 2025, a ser celebrado entre a J&F S.A. e a Câmara de Comercialização de Energia Elétrica - CCEE, decorrente da análise da Consulta Pública nº 216/2026. Diário Oficial da União: seção 1, Brasília, DF, 16 abr. 2026. Disponível em: <https://www.gov.br/mme/pt-br/acao-a-informacao/legislacao/portarias/2026/portaria-mme-n-913-2026.pdf>. Acesso em: 6 maio 2026.

CHUEWANGKAM, N.; KIDKHUNTHOD, P.; PINITSOONTORN, S. Direct evidence for the mechanism of early-stage geopolymerization process. **Case Studies in Construction Materials**, v. 21, art. e03539, 2024. DOI: 10.1016/j.cscm.2024.e03539. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2024.e03539>. Acesso em: 26 abr. 2026.

CREMASCO, M. A. **Operações unitárias em sistemas particulados e fluidomecânicos**. 3. ed. São Paulo: Blucher, 2018. 424 p. Disponível em: https://www.blucher.com.br/operacoes-unitarias-em-sistemas-particulados-e-fluidomecnicos_9788521213635. Acesso em: 13 jul. 2026.

DAMBROS, V. A. C. **Produção de ácido sulfúrico a partir da oxidação hidrotérmica da pirita presente no carvão mineral proveniente da jazida de Candiota-RS**. 2023. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Química) - Universidade Federal do Pampa, Bagé, 2023. Disponível em: <https://repositorio.unipampa.edu.br/server/api/core/bitstreams/33e1bbff-f157-45b6-af9e-cc010980472b/content>. Acesso em: 24 abr. 2026.

DAVIDOVITS, J. **Geopolymer chemistry and applications**. 5. ed. Saint-Quentin: Institut Géopolymère, 2020. ISBN 978-2-9544531-1-8. Disponível em: <https://www.geopolymer.org/wp-content/uploads/geopolymer-book-chapter1.pdf>. Acesso em: 14 jul. 2026.

EL ALOUANI, M. *et al.* A comprehensive review of synthesis, characterization, and applications of aluminosilicate materials-based geopolymers. **Environmental Advances**, v. 16, art. 100524, 2024. DOI: 10.1016/j.envadv.2024.100524. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.envadv.2024.100524>. Acesso em: 26 abr. 2026.

EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA. **Balanco energético nacional 2025: ano-base 2024**. Rio de Janeiro: EPE, 2025. Disponível em:

<https://www.epe.gov.br/pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/balanco-energetico-nacional-2025>. Acesso em: 6 maio 2026.

FARACO, M. N. S. *et al.* An overview of the coal circularity in Brazil: a new sustainable approach based on sampling method, characterization, and waste valorization. **Resources Policy**, v. 102, art. 105496, 2025. DOI: 10.1016/j.resourpol.2025.105496. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.resourpol.2025.105496>. Acesso em: 6 maio 2026.

FERREIRA, A. P. *et al.* A comprehensive mechanical and physico-chemical characterization of fly ash-based geopolymers. **Results in Engineering**, v. 28, art. 108150, 2025. DOI: 10.1016/j.rineng.2025.108150. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.rineng.2025.108150>. Acesso em: 28 abr. 2026.

GARCIA, E. *et al.* Systematic characterization of selenium speciation in coal fly ash. **Environmental Science: Processes & Impacts**, v. 26, n. 12, p. 2240-2249, 2024. DOI: 10.1039/D4EM00398E. Disponível em: <https://doi.org/10.1039/D4EM00398E>. Acesso em: 6 maio 2026.

GHANIM, H. A. A. E. *et al.* Innovative in-house sodium silicate derived from coal bottom ash and its impact on geopolymer mortar. **Journal of Building Engineering**, v. 99, art. 111428, 2025. DOI: 10.1016/j.jobbe.2024.111428. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2024.111428>. Acesso em: 26 abr. 2026.

GONG, K.; WHITE, C. E. Development of physics-based compositional parameters for predicting the reactivity of amorphous aluminosilicates in alkaline environments. **Cement and Concrete Research**, v. 174, art. 107296, 2023. DOI: 10.1016/j.cemconres.2023.107296. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2023.107296>. Acesso em: 25 jun. 2026.

HOSSAIN, M. A.; HOSSAIN, K. M. A. Physical, compressive strength, and microstructural characteristics of alkali-activated engineered composites incorporating MgO, MWCNTs, and rGO. **Applied Sciences**, v. 15, n. 4, art. 1712, 2025. DOI: 10.3390/app15041712. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/app15041712>. Acesso em: 6 maio 2026.

HOWER, J. C. *et al.* Understanding coal quality and the critical importance of comprehensive coal analyses. **International Journal of Coal Geology**, v. 263, art. 104120, 2022. DOI: 10.1016/j.coal.2022.104120. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.coal.2022.104120>. Acesso em: 6 maio 2026.

HOY, M. *et al.* Strength development of bottom ash-based geopolymer-stabilized recycled concrete aggregate as a pavement base material. **Coatings**, v. 15, n. 8, art. 935, 2025. DOI: 10.3390/coatings15080935. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/coatings15080935>. Acesso em: 6 maio 2026.

HUANG, W.; WANG, H. Formulation development of metakaolin geopolymer with good workability for strength improvement and shrinkage reduction. **Journal of Cleaner Production**, v. 434, art. 140431, 2024. DOI: 10.1016/j.jclepro.2023.140431.

Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2023.140431>. Acesso em: 28 abr. 2026.

IRIGON, P. I. **Reaproveitamento da cinza pesada de termelétrica a carvão mineral para obtenção de sílica gel**. 2021. Tese (Doutorado em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Escola de Engenharia, Porto Alegre, 2021. Disponível em: <https://lume.ufrgs.br/handle/10183/237449>. Acesso em: 26 abr. 2026.

JALAL, P. S.; SRIVASTAVA, V.; TIWARI, A. K. A critical review of geopolymers concrete: mechanisms, mix design methodologies, and circular economy potentials. **Journal of Architecture and Civil Engineering**, v. 10, n. 7, p. 84-95, 2025. DOI: 10.35629/8193-10078495. Disponível em: <https://doi.org/10.35629/8193-10078495>. Acesso em: 6 maio 2026.

JIANG, T. *et al.* Review on the impact of metakaolin-based geopolymer's reaction chemistry, nanostructure and factors on its properties. **Construction and Building Materials**, v. 412, art. 134760, 2024. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2023.134760. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2023.134760>. Acesso em: 28 abr. 2026.

JU, S. *et al.* Use of coal bottom ash for the production of sodium silicate solution in metakaolin-based geopolymers concerning environmental load reduction. **Construction and Building Materials**, v. 391, art. 131846, 2023. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2023.131846. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2023.131846>. Acesso em: 26 abr. 2026.

JUNUSSOV, M. *et al.* Evaluating coal quality and trace elements of the Karagandy Coal Formation (Kazakhstan): implications for resource utilization and industry. **Resources**, v. 15, n. 1, art. 5, 2026. DOI: 10.3390/resources15010005. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/resources15010005>. Acesso em: 28 abr. 2026.

KALKREUTH, W. *et al.* Vacuum pyrolysis of Brazilian coal, peat and biomass: results on characterization of feedstock, solid residues, pyrolysis liquids and conversion rates. **Energy Exploration & Exploitation**, v. 42, n. 3, p. 817-836, 2024. DOI: 10.1177/01445987231225253. Disponível em: <https://doi.org/10.1177/01445987231225253>. Acesso em: 19 maio 2026.

KEHINDE, O.; HUGHES, D. J.; AMALU, E. H. Critical methods of geopolymer feedstocks activation for suitable industrial applications. **Heliyon**, v. 10, n. 9, art. e29771, 2024. DOI: 10.1016/j.heliyon.2024.e29771. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e29771>. Acesso em: 6 maio 2026.

KU MEH, K. M. F. *et al.* An experimental investigation of coal bottom ash as sand replacement. **International Journal of GEOMATE**, v. 23, n. 99, p. 17-24, 2022. DOI: 10.21660/2022.99.3515. Disponível em: <https://doi.org/10.21660/2022.99.3515>. Acesso em: 26 jun. 2026.

KUMAR, S. *et al.* Enhancement of subgrade soil properties using coal bottom ash and basalt fiber for sustainable pavement applications. **Transportation Engineering**,

v. 21, art. 100377, 2025. DOI: 10.1016/j.treng.2025.100377. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.treng.2025.100377>. Acesso em: 1 maio 2026.

LI, M. *et al.* Preparation and characterization of low-activity coal bottom ash-based cementitious materials via orthogonal experiment. **Journal of Building Engineering**, v. 96, art. 110495, 2024. DOI: 10.1016/j.jobbe.2024.110495. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2024.110495>. Acesso em: 28 abr. 2026.

LINHARES, F. A. *et al.* Avaliação de emissões atmosféricas e cinzas geradas na cocombustão de carvão mineral com resíduos florestais. **Ciência Florestal**, Santa Maria, v. 34, n. 4, art. e83749, 2024. DOI: 10.5902/1980509883749. Disponível em: <https://doi.org/10.5902/1980509883749>. Acesso em: 18 maio 2026.

LUCENA, G. *et al.* Novel material obtained from the gasification residues of Candiota Mine's coal for cationic dye adsorption. **Mining**, v. 3, n. 2, p. 271-283, 2023. DOI: 10.3390/mining3020017. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/mining3020017>. Acesso em: 1 jul. 2026.

LV, L. *et al.* An investigation into the composition of the mineral phase of fly ash using advanced techniques. **Global NEST Journal**, v. 27, n. 3, p. 1-8, 2025. DOI: 10.30955/gnj.06883. Disponível em: <https://doi.org/10.30955/gnj.06883>. Acesso em: 6 maio 2026.

MENDA, S. *et al.* Determining optimum coal bottom ash/slag content for sustainable concrete infrastructure. **Sustainability**, v. 17, n. 4, art. 1429, 2025. DOI: 10.3390/su17041429. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/su17041429>. Acesso em: 18 maio 2026.

MOHAN KUMAR, S. G. K. *et al.* Geopolymer chemistry and composition: a comprehensive review of synthesis, reaction mechanisms, and material properties—Oriented with sustainable construction. **Materials**, v. 18, n. 16, art. 3823, 2025. DOI: 10.3390/ma18163823. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/ma18163823>. Acesso em: 26 abr. 2026.

NADIROV, R. *et al.* Integrated compositional modeling and machine learning analysis of REE-bearing coal ash from a weathered dumpsite. **Minerals**, v. 15, n. 7, art. 734, 2025. DOI: 10.3390/min15070734. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/min15070734>. Acesso em: 6 maio 2026.

NASCIMENTO, M.; SOARES, P. S. M. Potential impact of coal mining and use for electricity generation in Brazil on global warming. **Journal of Sustainable Mining**, v. 24, n. 1, art. 5, p. 65-75, 2025. DOI: 10.46873/2300-3960.1439. Disponível em: <https://doi.org/10.46873/2300-3960.1439>. Acesso em: 6 maio 2026.

OFOE, J. T.; YUSUF, M.; IBRAHIM, H. A review on coal pyrolysis and gasification: understanding the chemistries and influence of operating conditions. **Clean Energy**, v. 9, n. 5, p. 3-21, 2025. DOI: 10.1093/ce/zkaf021. Disponível em: <https://doi.org/10.1093/ce/zkaf021>. Acesso em: 1 jul. 2026.

OSKAY, R. G. Coal properties of Carboniferous Kurtköy coals (Zonguldak, NW Türkiye): emphasis on rank, provenance of minerals and hydrocarbon generation potential. **Geologica Acta**, v. 23, art. 16, p. 1-31, 2025. DOI: 10.1344/Geologica2025.23.16. Disponível em: <https://doi.org/10.1344/Geologica2025.23.16>. Acesso em: 28 abr. 2026.

PETROVIĆ, M.; FIKET, Ž. Environmental damage caused by coal combustion residue disposal: a critical review of risk assessment methodologies. **Chemosphere**, v. 299, art. 134410, 2022. DOI: 10.1016/j.chemosphere.2022.134410. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2022.134410>. Acesso em: 6 maio 2026.

PREMLALL, K.; KOECH, L. Influence of coal rank, ash, mineral content, and maceral composition on CO₂ adsorption in South African coals. **Cleaner Chemical Engineering**, v. 11, art. 100160, 2025. DOI: 10.1016/j.clce.2025.100160. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.clce.2025.100160>. Acesso em: 28 abr. 2026.

PROVIS, J. L.; VAN DEVENTER, J. S. J. (ed.). **Alkali activated materials: state-of-the-art report, RILEM TC 224-AAM**. Dordrecht: Springer, 2014. 388 p. (RILEM State-of-the-Art Reports, v. 13). DOI: 10.1007/978-94-007-7672-2. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/978-94-007-7672-2>. Acesso em: 14 jul. 2026.

RIASETIWAN, M. *et al.* Coal rank data analytic for ASTM and PSDBMP classification. **International Journal of Innovative Research and Scientific Studies**, v. 6, n. 2, p. 374-380, 2023. DOI: 10.53894/ijirss.v6i2.1469. Disponível em: <https://doi.org/10.53894/ijirss.v6i2.1469>. Acesso em: 6 maio 2026.

ROCHANAVIBHATA, U. *et al.* Sustainable use of laterite replaced with bottom ash as road construction materials. **International Journal of Sustainable Engineering**, v. 17, n. 1, p. 650-667, 2024. DOI: 10.1080/19397038.2024.2394547. Disponível em: <https://doi.org/10.1080/19397038.2024.2394547>. Acesso em: 6 maio 2026.

SA RIBEIRO, R. A. *et al.* Metakaolin-based geopolymer matrix formulations for higher strength and thermal stability. **Materials and Structures**, v. 58, n. 4, art. 142, 2025. DOI: 10.1617/s11527-025-02670-5. Disponível em: <https://doi.org/10.1617/s11527-025-02670-5>. Acesso em: 6 maio 2026.

SAMOUH, H. *et al.* Enhancing phase identification in waste-to-energy fly ashes: role of Raman spectroscopy, background fluorescence, and photobleaching. **Journal of Hazardous Materials**, v. 460, art. 132462, 2023. DOI: 10.1016/j.jhazmat.2023.132462. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2023.132462>. Acesso em: 1 jul. 2026.

SCHACKOW, A. *et al.* Coal bottom ash as supplementary cementitious material: optimizing reactivity through particle grinding. **Sustainability**, v. 17, n. 11, art. 5031, 2025. DOI: 10.3390/su17115031. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/su17115031>. Acesso em: 18 maio 2026.

SILVA, A. M. **Análise da distribuição dos parâmetros de qualidade do carvão da Mina de Candiota e sua influência nas operações de lavra**. 2013. Projeto Integrado de Mineração II - Universidade Federal do Pampa, Caçapava do Sul,

2013. Disponível em:

<https://cursos.unipampa.edu.br/cursos/tecnologiaemmineracao/files/2019/10/analise-da-distribuicao-dos-parametros-de-qualidade-do-carvao-da-mina-de-candiota-e-sua-influencia-nas-operacoes-de-lavra.pdf>. Acesso em: 1 jul. 2026.

SIMÕES, B. B. **Avaliação do resíduo de dessulfurização da termelétrica de Candiota - RS como material suplementar no cimento Portland**. 2022. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Química) - Escola de Química, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2022. Disponível em: <http://hdl.handle.net/11422/20291>. Acesso em: 1 jul. 2026.

SIYAL, A. A. *et al.* A comprehensive review of synthesis kinetics and formation mechanism of geopolymers. **RSC Advances**, v. 14, n. 1, p. 446-462, 2024. DOI: 10.1039/D3RA06205H. Disponível em: <https://doi.org/10.1039/D3RA06205H>. Acesso em: 26 abr. 2026.

TAMANNA, K. *et al.* Coal bottom ash as supplementary material for sustainable construction: a comprehensive review. **Construction and Building Materials**, v. 389, art. 131679, 2023. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2023.131679. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2023.131679>. Acesso em: 26 abr. 2026.

WALLAH, S. E. *et al.* The mechanical properties of kaolin-based geopolymer concrete with Portland cement addition. **Engineering, Technology & Applied Science Research**, v. 15, n. 4, p. 24311-24320, 2025. DOI: 10.48084/etasr.10199. Disponível em: <https://doi.org/10.48084/etasr.10199>. Acesso em: 25 jun. 2026.

WITTE, A.; GARG, N. Particle shape, crystallinity, and degree of polymerization of fly ash via combined SEM-EDS and Raman spectroscopy. **Cement and Concrete Research**, v. 184, art. 107612, 2024. DOI: 10.1016/j.cemconres.2024.107612. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2024.107612>. Acesso em: 29 abr. 2026.