

VIABILIDADE DO USO DA CINZA PESADA DO CARVÃO MINERAL COMO MATERIAL CIMENTÍCIO SUPLEMENTAR E AGREGADO MIÚDO EM ARGAMASSAS¹

Etiane Rickes Vieira²
Cleudson Rosa Alves³

Resumo: O carvão mineral é responsável pelo suprimento de energia elétrica em grande parte do Brasil. No entanto, após sua queima, 20% de seu resíduo vai para aterros sanitários, que se descartados inadequadamente podem causar impactos ambientais. Desse modo, a incorporação da cinza pesada em materiais cimentícios vem se tornando relevante em diversos estudos, com o propósito de gerar valor, reduzir impactos ambientais e contribuir para o desenvolvimento de soluções mais sustentáveis na indústria da construção civil. Para isso, este estudo avaliou a viabilidade técnica e ambiental da utilização da cinza pesada proveniente da queima de carvão mineral como material cimentício suplementar e como agregado em matrizes cimentícias. Foram realizados ensaios de granulometria por peneiramento, massa específica, índice de consistência, solubilidade, lixiviação, reatividade, corrosividade, calorimetria, resistência à compressão e pozolanicidade. Os traços das argamassas foram determinados com proporções de 0%, 25%, 50%, 75% e 100% de substituição do agregado miúdo e/ou cimento no qual passaram por um processo de cura de 28 dias até o rompimento dos corpos de prova. Os resultados indicaram que a cinza pesada é classificada como resíduo Classe II A, não perigoso e não inerte. Em seu estado fresco observou-se redução da trabalhabilidade com o aumento de teor de cinzas, demandando maior consumo de água e aditivo. No estado endurecido, a mistura no qual substituiu 50% de agregado miúdo por cinza, teve um aumento de resistência de 352% em relação ao traço de referência, da mesma forma os traços com substituição em até 25% de cimento por cinza se mostraram promissores. O ensaio de pozolanicidade forneceu indícios de reatividade onde a cinza pesada apresentou melhor desempenho técnico como agregado miúdo. Acredita-se que a incorporação de resíduo em matrizes cimentícias é uma alternativa sustentável para o reaproveitamento deste resíduo como substituto parcial da areia em argamassas.

Palavras-chave: Cinza pesada; Matrizes cimentícias; Resíduos; Materiais pozolânicos; Sustentabilidade.

¹ Artigo apresentado ao curso de Engenharia Civil do Instituto Federal de Santa Catarina, para obtenção do título de bacharel em Engenharia Civil. 2025. Orientador: Prof. Cleudson Rosa Alves, Professor do Instituto Federal de Santa Catarina, Doutor em Ciência e Engenharia de Materiais - PPGCEM.

² Discente do curso de Graduação em Engenharia Civil do Instituto Federal de Santa Catarina. etiane.rv@aluno.ifsc.edu.br.

³ Professor do curso de Graduação em Engenharia Civil do Instituto Federal de Santa Catarina. cleudson.alves@ifsc.edu.br.

1 INTRODUÇÃO

A utilização do carvão mineral como fonte de geração de energia possui relevância socioeconômica em nosso país, já que segundo a Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL, 2025), no estado de Santa Catarina, a geração de energia a partir do carvão mineral atinge uma potência de 745.000 kW. Apesar de gerar energia para parte da população no sul do país, o carvão mineral é um recurso natural e classificado como uma fonte não renovável e poluente gerando dois tipos de resíduos, sendo a cinza volante, a qual é utilizada em larga escala na indústria cimentícia, e a cinza pesada que hoje não possui aproveitamento, a qual acaba indo para aterros sanitários.

Segundo a Associação Brasileira de Carvão Mineral (ABCS, 2022), o estado de Santa Catarina teve a extração de um pouco mais de seis milhões de toneladas de carvão bruto. Deste modo, o processo de beneficiamento e queima do carvão mineral resulta na geração de um volume de cinzas proporcional à massa de carvão consumida, alcançando, em média, uma equivalência de 1:1 (IRIGON, 2021). Esse processo gera a quantidade proporcional de 80% de cinzas volantes e 20% de cinzas pesadas. Assim, o descarte inadequado do grande volume de cinzas pesadas pode provocar sérios impactos ambientais, como a lixiviação e a contaminação do solo e de lençóis freáticos por compostos tóxicos (COSTA *et al.*, 2023; IRIGON, 2021).

A cinza pesada é um resíduo Classe II A (não perigoso) e não inerte, o que dificulta a sua reciclagem. No entanto, a incorporação da cinza pesada em matrizes cimentícias têm se mostrado uma alternativa tecnicamente viável, uma vez que permitem o desenvolvimento de materiais cimentícios com baixa emissão de carbono (COSTA *et al.*, 2023).

Há diversas pesquisas com a utilização da cinza pesada como substituta de agregados e de cimentos. De acordo com (REPETTE *et al.*, 2011) em seu estudo com concreto autoadensável com a utilização de cinza pesada moída como substituição do Cimento Portland em 10% e 25%, evidenciou que há indícios de que o resíduo atua como pozolana devido ao fato do não comprometimento da resistência à compressão nos corpos de prova. Da mesma forma (SILVA *et al.*, 2020), em sua pesquisa com blocos intertravados de concreto, com 6% de substituição do agregado miúdo por cinza pesada observou no seu ensaio de

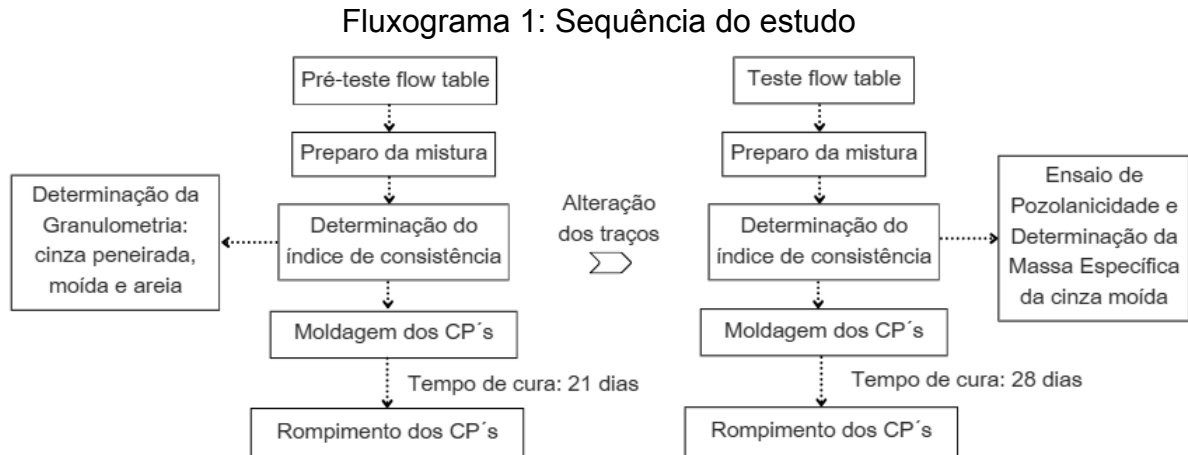
resistência a compressão que os resultados são inferiores ao mínimo solicitado por norma, sendo um potencial apenas para utilização em áreas de menor solicitação de tráfego. Já (COSTA *et al.*, 2023), investigou pastas álcali-ativadas com adição de cinza volante e cinza pesada, evidenciou em seus resultados que a resistência mecânica tende a diminuir com o aumento do teor de cinza pesada, contudo, a pasta contendo 100% de cinza pesada alcançou 14,4 MPa, indicando potencial de aplicação.

Em complemento, os aditivos superplastificantes, são um ponto importante para a confecção das argamassas. Denominados redutores de água, estão entre os mais empregados em matrizes cimentícias, uma vez que modificam a viscosidade de misturas com baixa relação água/cimento. Segundo (RIBEIRO *et al.*, 2020), além de melhorar a trabalhabilidade, esses aditivos possibilitam o aumento da resistência à compressão e do módulo de elasticidade no estado endurecido, desde que empregados com o objetivo de reduzir o teor de água sem alterar a proporção de cimento da composição.

Finalmente, o objetivo deste estudo é avaliar a viabilidade técnica e ambiental da incorporação da cinza pesada oriunda da queima do carvão mineral em argamassas de cimento, determinando sua contribuição como agregado ou como material pozolânico. Para alcançar esse objetivo, e verificar o impacto da substituição do cimento ou da areia pela cinza pesada do carvão, foram analisadas propriedades físicas e mecânicas das argamassas no estado fresco e endurecido, comparando diferentes composições com o traço de referência.

2 MATERIAIS E MÉTODOS

A sequência de atividades que incluem a preparação, testes preliminares, ensaios e análises, são apresentados de forma esquemática e resumida no Fluxograma 1, e melhor descrita nos tópicos deste capítulo.



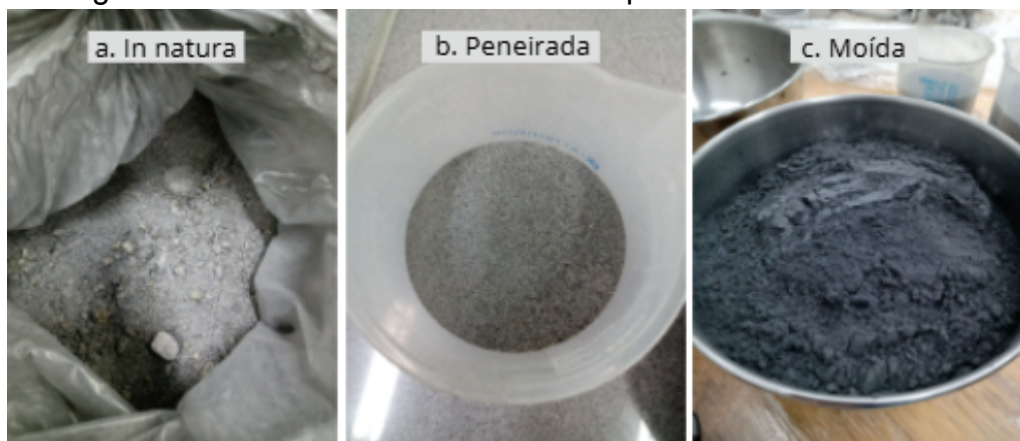
Fonte: Autora (2025).

2.1 Materiais

2.1.1 Cinza Pesada

A cinza pesada de carvão mineral foi obtida das caldeiras do Complexo Termelétrico Jorge Lacerda, localizada no município de Capivari de Baixo, no estado de Santa Catarina, já previamente seca a 105 ± 5 °C por 24h. Em sua preparação foi utilizada uma peneira com abertura de malha de 0,6 mm e o material passante foi cominuído em moinho de bolas planetário da marca THERMOCERAM com rotação de 400 rpm, com 200 gramas por 6 minutos. O método de moagem seguiu os parâmetros citados anteriormente até se obter a quantidade necessária para a pesquisa. A Imagem 1 mostra o processo de mudança da morfologia da cinza pesada para o referente estudo.

Imagem 1 - Amostra do resíduo da cinza pesada do carvão mineral



Fonte: Autora (2025).

A empresa Diamante, no qual opera a termelétrica, forneceu a Ficha de Informações de Segurança de Produto Químico (FISPQ), na qual descreve a Tabela 1 a composição química da cinza pesada em seu estado pós-queima.

Tabela 1 - Composição química da cinza pesada

Cinza pesada	
Dióxido de Silício, SiO ₂ , amorfo	45-65 %
Óxido de Alumínio, Al ₂ O ₃	20-35 %
Óxido de Ferro, FeO ₃	1-10 %
Dióxido de Titânio, TiO ₂	0,5-2 %
Óxido de Cálcio, CaO	1-2 %
Trióxido de Enxofre, SO ₃	0-1,5 %

Fonte: Diamante Geração de Energia (2020).

Observa-se que o resíduo é constituído majoritariamente por óxidos, totalizando aproximadamente 95% de sua composição, sendo o dióxido de silício, óxido de alumínio e óxido de ferro os compostos químicos mais predominantes.

2.1.2 Cimento

O cimento utilizado para este estudo foi o CP V ARI, da marca Votoran, caracterizado por possuir alta resistência inicial devido a sua composição de até 5% de filler calcário.

2.1.3 Agregado Miúdo

O agregado miúdo utilizado para esta pesquisa foi a areia natural de granulometria média, proveniente da região sul de Santa Catarina. Antes de ser incorporada nas misturas, o material foi peneirado com a peneira 1,18 mm a fim de manter sua granulometria mais homogênea. Em seguida, as quantidades necessárias foram pesadas e devidamente armazenadas.

2.1.4 Aditivo

Para obter melhor desempenho, coesão, aumento do tempo de trabalhabilidade e estabilidade do ar incorporado nas misturas com a cinza pesada, o aditivo utilizado foi o surfactante incorporador de ar Liga ArgaPlast Super, fabricado pela empresa Liga Química, localizada na cidade de Araranguá em Santa Catarina. Assim, o aditivo foi utilizado para reduzir a quantidade de água necessária para obter a consistência adequada.

2.2 Métodos

2.2.1 Características Ambientais

Para o presente estudo, foram realizados ensaios no Laboratório da SATC com o objetivo de verificar a conformidade ambiental da cinza pesada de carvão mineral. Foram realizados ensaios de corrosividade, reatividade, lixiviação e solubilização com base nos critérios da norma NBR 10004 (ABNT, 2004)

responsável pela classificação de resíduos sólidos quanto ao seu potencial de risco à saúde humana e ao meio ambiente.

2.2.2 Características Físicas

A fim de determinar as características físicas dos materiais utilizados neste estudo, segue os métodos de ensaio e normas utilizadas.

2.2.2.1 Granulometria por peneiramento

A determinação da composição granulométrica foi realizada conforme a NBR 17054 (ABNT, 2022). Para realização do ensaio foram separadas 400 gramas de cada material a ser estudado sendo eles a cinza peneirada, cinza moída e areia média. O conjunto de peneiras foi conectado e ligado ao agitador mecânico a fim de permitir a separação dos diferentes tamanhos dos grãos da areia, por 10 minutos.

Os resultados foram comparados com os limites superiores e inferiores determinados pelas zonas ótimas e utilizáveis para o agregado miúdo definidas conforme NBR 7211 (ABNT, 2022). Foram obtidas as porcentagens retidas em cada peneira, além de determinar do Módulo de Finura (MF) e Diâmetro Máximo Característico (DMC) dos respectivos materiais.

2.2.2.2 Massa específica

Para determinação da massa específica da cinza pesada moída baseou-se na NM 23 (ABNT, 2000), no qual estabelece o método utilizando o frasco volumétrico de Le Chatelier com líquido não reagente com a cinza, sendo empregado, neste caso, o querosene.

Inicialmente, o frasco foi preenchido com querosene com o auxílio de um funil, até a primeira leitura do nível de volume do recipiente. Em seguida, adicionou-se aproximadamente 60 gramas da amostra do resíduo até a segunda leitura de volume, em milímetros, para posterior cálculo da massa específica com os dados coletados.

2.2.2.3 Dosagem da argamassa

Inicialmente foi feito um pré-teste para se obter a consistência ideal e a relação água/cimento necessária para moldagem dos corpos de prova prismáticos nas dimensões 40x40x160mm. Nestes ensaios iniciais, foram substituídos o agregado miúdo por 0%, 50% e 100% por cinza pesada, totalizando 3 corpos de prova para cada traço da argamassa, os quais foram curados submersos em água por 21 dias. O uso de cimento se manteve constante em todas as variações. Já a água teve um valor base e foi acrescentado conforme necessidade da trabalhabilidade.

A preparação da amostra e a determinação do índice de consistência seguiam os procedimentos das Normas NBR 16541 (ABNT, 2016) e NBR 13276 (ABNT, 2016), respectivamente. Para o pré-teste não foi utilizado nenhum aditivo na composição dos corpos de prova. Após o tempo de cura de 21 dias foi realizado o teste de resistência por compressão e tração na flexão.

Após a realização do pré-teste, optou-se por modificar as proporções de substituição do agregado, incluindo a substituição do cimento pela cinza pesada a

fim de verificar se a cinza pesada apresenta comportamento característico de um material pozolânico ou se atua predominantemente como agregado. Dessa forma, manteve-se um corpo de prova de 0% de substituição como referência (REF) para o estudo, e os demais corpos de prova foram preparados com substituições de 25%, 50%, 75% e 100% do cimento e/ou agregado miúdo por cinza pesada. Deste modo optou-se a utilização do traço de referência como 1 cimento: 4 agregado: 1 água: 0,4% aditivo, e os demais traços foram baseados em um índice de consistência padrão para todas as amostras.

A partir do pré-teste foram propostos os seguintes traços de argamassa, conforme Tabela 2:

Tabela 2: Traços das argamassas

Mistura	Cimento (g)	Areia (g)	Cinza (g)	Água (ml)	Aditivo (ml)
REF	350	1400	0	350	7
ACP50	350	700	700	350	7
CCP50	175	1400	175	350	7
C50A50	175	700	875	500	14
CCP25	262,5	1400	87,5	350	7
C75A50	262,5	700	787,5	500	7

Fonte: Autora (2025).

Para melhor compreensão das misturas utilizadas, adotou-se a seguinte nomenclatura: A = Areia, C = Cimento, CP = Cinza Pesada. A primeira letra da sigla representa o material que foi parcialmente substituído pelo resíduo e de modo seguinte o percentual da cinza pesada empregado na substituição. Nos casos em que a sigla CP não aparece, indica que a cinza substituiu o agregado miúdo e o cimento, representando os percentuais de cada material presentes na mistura.

2.2.2.4 Índice de consistência e cura dos corpos de prova

Para a preparação da mistura dos materiais, foram pesados e separados de acordo com as proporções estabelecidas na Tabela 2, utilizou-se a argamassadeira para a mistura, seguido conforme orientações da norma NBR 16541 (ABNT, 2016). A sequência específica de mistura foi iniciada com o cimento e a cinza, juntamente com 75% da água e o aditivo, sendo esses componentes misturados por 60 segundos. Em seguida, adicionou-se a areia, mantendo a argamassadeira em baixa velocidade. Após a inclusão do restante da água, a mistura prosseguiu por mais 120 segundos em velocidade alta. Na sequência, encaminhou-se à flow table para determinação do índice de consistência conforme norma NBR 13276 (ABNT, 2016). Foram moldados 3 corpos de prova para cada traço, totalizando 18 corpos de prova prismáticos, previamente untados com desmoldante sólido para facilitar a desforma. Em seguida, foram deixados em repouso por 72 horas, e em seguida, foram curados submersos em água até os 28 dias para o rompimento dos corpos de prova prismáticos, conforme procedimentos da norma NBR 16738 (ABNT, 2019).

2.2.2.5 Ensaio de resistência mecânica

Os ensaios de resistência à compressão e a tração na flexão foram realizados em máquina da marca EMIC, modelo DL 300 com célula de carga de 300 kN, à qual se encontra no Laboratório de Sistemas Estruturais Materiais do IFSC. Após o processo de cura, submersos em água por 28 dias, o rompimento foi realizado e fornecido um relatório com os resultados dos ensaios, apresentados em MPa. Os procedimentos foram realizados de acordo com a NBR 16738 (ABNT, 2019).

2.2.2.6 Ensaio de Calorimetria semi-adiabática

O ensaio de calorimetria determina o tempo de início de pega por meio da reação exotérmica liberada pela mistura, assim como o calor de hidratação das amostras. Foram ensaiados três traços diferentes de pastas: apenas cimento CP V ARI, 10% de cinza pesada com CP V ARI e 25% de cinza pesada com CP V ARI. O tempo foi contabilizado a partir da adição de água, utilizando uma relação a/c de 0,5. As misturas foram monitoradas por 6 dias registrando a temperatura a cada 5 minutos, em um equipamento de calorimetria semi-adiabática. O início de pega pode ser determinado pela intersecção da reta tangente ao ponto de maior α e a reta horizontal traçada sobre a base da curva calorimétrica (MULLER, 2023). Deste modo, foi possível realizar a determinação gráfica do tempo de início de pega considerando o teorema do valor médio.

2.2.3 Características químicas

2.2.3.1 Ensaio de pozolanicidade

Para avaliar a atividade química e identificar a potencial reação pozolânica da cinza pesada, foi executado o ensaio de acordo com os procedimentos estabelecidos conforme NBR 5751 (ABNT, 2015).

A partir da obtenção da massa específica da cinza moída no ensaio anterior, pode-se calcular a quantidade necessária, em gramas, da cinza moída para realização do ensaio de pozolanicidade, estabelecida em norma.

A massa específica do hidróxido de cálcio foi fornecida pelo fabricante: 2,28 g/cm³. Separou-se a areia normal para a mistura da argamassa, de acordo com a NBR 7214 (ABNT, 2015). Na sequência, as quantidades de cinza e hidróxido de cálcio foram misturadas na argamassadeira com 250ml de água por 2 minutos, para posteriormente ser adicionada areia normal. Realizou-se o ensaio de Índice de Consistência, obtendo-se 210 mm de espalhamento, obtidos pela média aritmética de três medições. Em seguida, procedeu-se à moldagem dos corpos de prova cilíndricos de 50 mm de diâmetro e 100 mm de altura. Decorridas 24 horas, os corpos de prova foram submetidos pelo processo de cura em estufa a 55 °C pelo período de 144 horas. Em seguida, foram retirados com 2 horas de antecedência para resfriamento para posteriormente serem rompidos.

3. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Com a realização dos ensaios, obteve-se os resultados nos quais serão descritos e analisados na sequência:

3.1 Caracterização ambiental da cinza

As Tabelas 3, 4, 5 e 6 com os resultados obtidos nos ensaios de caracterização ambiental são apresentados a seguir.

Tabela 3 - Análise de Corrosividade do resíduo

Corrosividade		
Análise	Resultado	Valor recomendado
pH em água (1:1)	7,78	2,2 a 12,4

Fonte: Autora (2025).

Tabela 4 - Análise de Reatividade do resíduo

Reatividade		
Análise	Resultado (mg/kg)	Valor máximo (mg/kg)
Sulfeto	0,04	50

Fonte: Autora (2025).

Tabela 5 - Análise de Lixiviação do resíduo

Lixiviação		
Análise	Resultado (mg/L)	Valor máximo (mg/L)
Arsênio	0,024	1
Bário	0,232	70
Cádmio	0,010	0,5
Chumbo	0,012	1
Cromo Total	<0,010	5
Fluoreto Total	0,150	150
Prata	<0,010	0,1
Selênio	0,062	5,0
Mercúrio	<0,0002	0,1

Fonte: Autora (2025).

Tabela 6 - Análise de Solubilização do resíduo

Solubilização		
Análise	Resultado (mg/L)	Valor máximo (mg/L)
Alumínio	0,436	0,200
Arsênio	0,042	0,010
Bário	0,030	0,700
Cádmio	<0,010	0,005
Chumbo	<0,010	0,010
Cloretos	2,06	250
Cobre	<0,010	2
Cromo Total	<0,010	0,050
Ferro	0,074	0,300
Fluoreto	0,31	1,5

Manganês	<0,010	0,100
Nitrato	0,085	10
Prata	<0,010	0,050
Selênio	0,032	0,010
Sódio	8,980	200
Sulfatos	78,82	250
Surfactantes	<0,100	0,5
Zinco	<0,010	5
Mercúrio	<0,0002	0,001
Fenóis Totais	<0,01	0,01

Fonte: Autora (2025).

Conforme resultados obtidos dos ensaios realizados, e avaliando os limites normativos estabelecidos, a cinza pesada de carvão mineral foi caracterizada como um resíduo não perigoso, não inerte, e Classe II A.

O ensaio de corrosividade tem como objetivo verificar se o resíduo apresenta características ácido-base capazes de causar degradação ou ataque químico a materiais com os quais possa ter contato NBR 10004 (ABNT, 2004). Os resultados indicaram que a cinza pesada não se enquadrou como resíduo corrosivo, mostrando que não possui potencial para provocar corrosão ou deterioração química em ambientes de disposição, apresentando ser um resíduo não perigoso.

Para o ensaio de reatividade, buscou-se identificar se o resíduo é capaz de sofrer reações químicas perigosas quando exposto a fontes de calor ou gases inflamáveis NBR 10004 (ABNT, 2004). Os resultados não indicaram ocorrência de reações, não apresentando características de reatividade que a enquadram como resíduo perigoso.

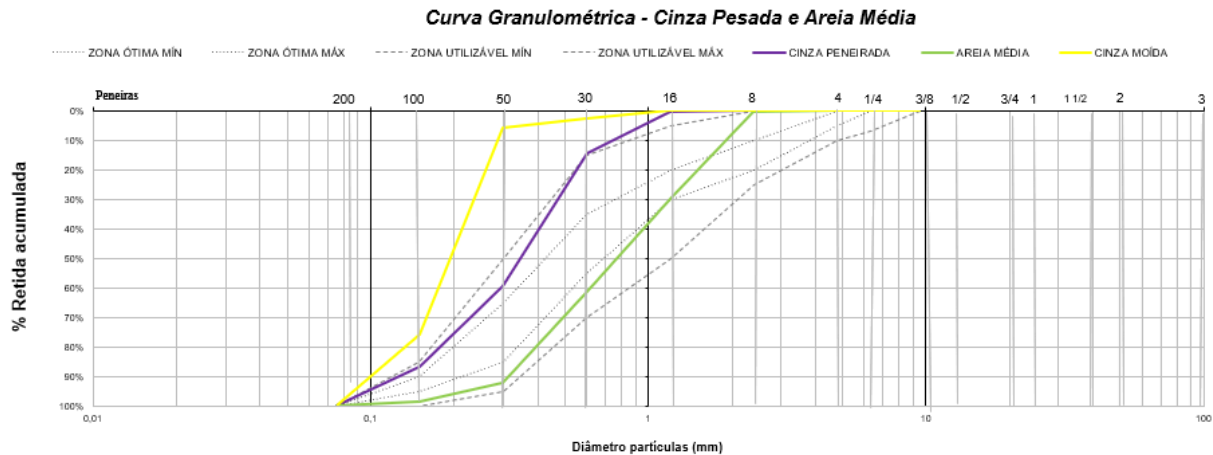
De acordo com a análise de lixiviação realizada, os valores de lixiviados apresentaram valores inferiores aos máximos permitidos por norma, mostrando que em condições ambientais mais agressivas, como pH ácido e reprodução de situações de maior severidade do que aquelas encontradas no ambiente, não há liberação de substâncias tóxicas NBR 10004 (ABNT, 2004).

Contudo, nas análises realizadas no extrato solubilizado foram identificadas concentrações de alumínio, arsênio e selênio acima dos limites permitidos, indicando a mobilização desses elementos em condições ambientais comuns. A presença desses contaminantes em níveis acima do permitido demonstra que a cinza pesada pode trazer impactos ambientais quando disposta de forma inadequada no ambiente. Em contato com o solo, especialmente em casos de precipitação ou umidade, causa a contaminação de aquíferos, trazendo risco ao meio ambiente e à saúde pública.

3.2 Granulometria da Cinza Pesada e Areia Média

O resultado da classificação granulométrica e apresentado no Gráfico 1, mostra os resultados da cinza peneirada, cinza moída e areia média, definido pelas zonas ótimas e utilizáveis com os limites superiores e inferiores.

Gráfico 1 - Curva Granulométrica da cinza pesada e areia média



Fonte: Autora (2025).

De acordo com o gráfico, a curva da cinza pesada moída não apresenta valores dentro dos limites definidos da zona utilizável de um agregado miúdo, por isso além do seu uso como agregado em diversos estudos. Na análise dos resultados a cinza moída apresentou 90% < 40 μm e 50% < 30 μm de finura, enquanto o cimento portland possui em média 50% < 20 μm e 100% < 40 μm , mostrando similaridade com a finura do cimento. Nesse sentido, os resultados indicam que é possível o estudo do material como substituto parcial do aglomerante nas matrizes de argamassa, ampliando seu uso para além da função de agregado.

A areia média está dentro dos limites definidos para utilização como agregado miúdo, na zona utilizável superior, apresentando-se como areia média-grossa. A cinza peneirada até o seu tamanho de abertura de malha 0,6 mm está dentro do limite superior da zona utilizável como agregado miúdo.

Obteve-se os dados de Diâmetro Máximo Característico (DMC) e Módulo de Finura (MF) representados na Tabela 7, a seguir:

Tabela 7 - Características granulométricas dos materiais

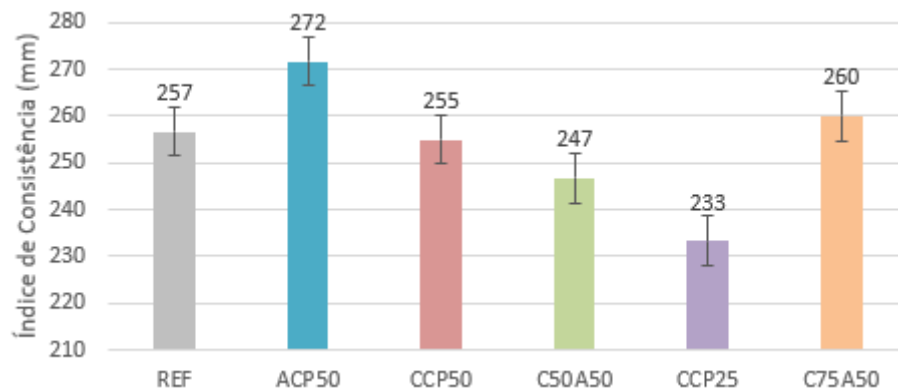
Características	Cinza Moída ---	Cinza Peneirada ---	Areia ---
DMC (mm)	0,300	0,600	0,600
MF	0,8	1,6	2,8

Fonte: Autora (2025).

3.3 Índice De Consistência

Os resultados do índice de consistência obtidos pelo abatimento e espalhamento das argamassas na mesa de fluxo são apresentados no Gráfico 2 e na Imagem 2.

Gráfico 2 - Resultados do Índice de Consistência



Fonte: Autora (2025).

Observa-se que a argamassa ACP50, no qual substituiu 50% da areia por cinza, apresentou um maior espalhamento em comparação à amostra referência, evidenciando que o uso de cinza pesada como agregado miúdo no teor de 50% melhora a fluidez e trabalhabilidade de argamassas. Esse resultado corrobora com a curva de distribuição granulométrica obtida no Gráfico 1, visto que a granulometria da areia média-grossa utilizada está dentro da zona ótima estabelecida por norma.

Em contrapartida, a amostra CCP25 com substituição de 25% do cimento por cinza, apresentou um menor índice de consistência.

A mistura C50A50 exigiu uma maior quantidade de aditivo para se manter na consistência, evidenciando que a partir do teor de 75% de substituição cimento por cinza pesada a trabalhabilidade se reduz, comprometendo seu desempenho em estado fresco (COSTA, 2023). Do mesmo modo, (PADILHA, 2021) destaca que quanto menor o diâmetro dos grãos, maior a área específica, o que demanda uma maior quantidade de água para homogeneizar todos os grãos. Em seu estudo, os traços de argamassa com maior percentual de substituição da cinza também demandaram de uma maior quantidade de aditivo para se manter na consistência.

Adicionalmente, as misturas C50A50 e C75A50, que obtiveram um maior teor do resíduo em comparação às demais amostras, demandaram de um maior consumo de água devido a cinza pesada possuir uma maior absorção de água por capilaridade (PADILHA, 2021).

A imagem 2 mostra o resultado do índice de consistência, percebe-se que a cor da argamassa escurece conforme o percentual de incorporação da cinza na mistura.

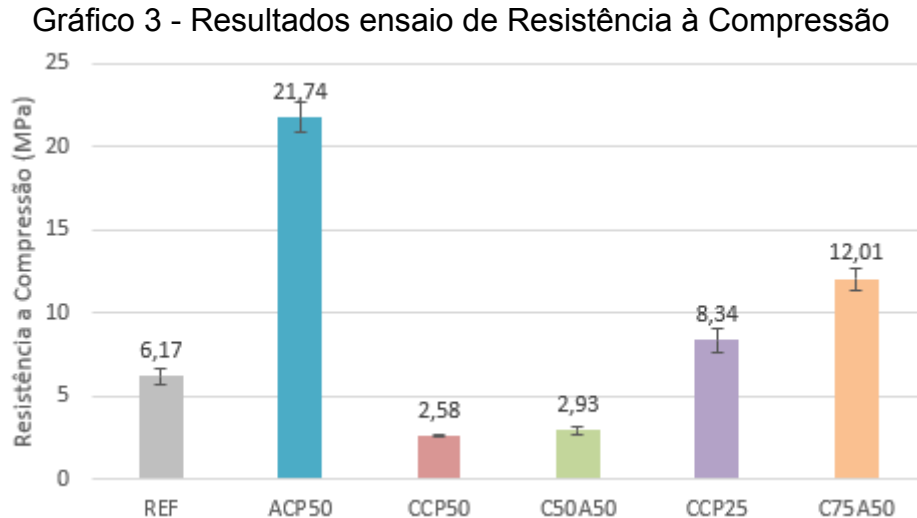
Imagem 2 - Espalhamento das argamassas



Fonte: Autora (2025).

3.4 Resistência à Compressão

Após a ruptura dos corpos de prova curados depois 28 dias, obteve-se os resultados de acordo com o Gráfico 3 a seguir:



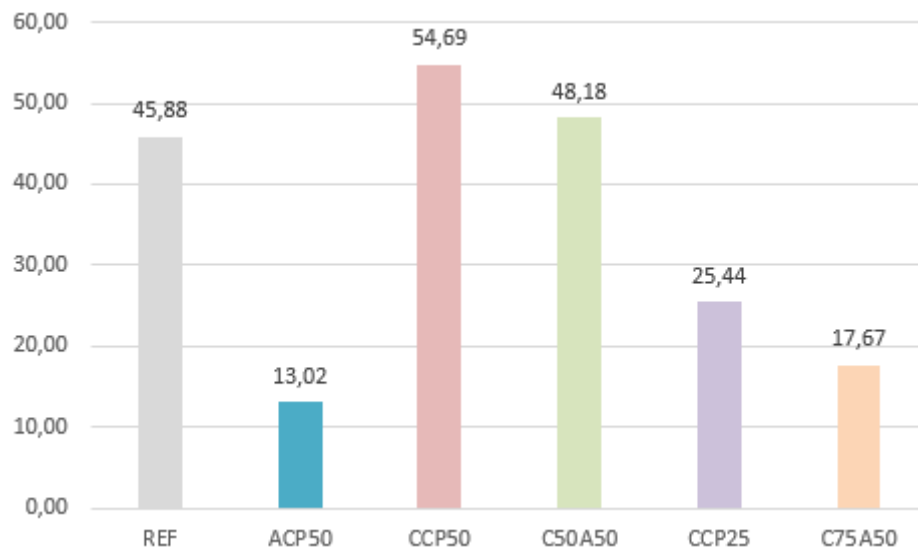
Fonte: Autora (2025).

O corpo de prova ACP50, no qual substituiu 50% da areia por cinza, apresentou a maior resistência à compressão entre todas as misturas avaliadas, com média de 21,74 MPa, corresponde a 352% maior do que a amostra de referência. Do mesmo modo, as misturas CCP50 e C50A50, apresentaram resultados similares com redução média de 44% quando comparadas com a mistura de referência e obtiveram menor resistência justamente por possuírem um percentual menor de cimento em sua composição.

O traço C50A50 demandou um consumo maior de aditivo em relação aos demais para alcançar uma trabalhabilidade adequada no momento do preparo da mistura.

Com substituição de 25% de cimento por cinza, o traço CCP25 apresentou um aumento em 135% na resistência em relação ao traço de referência. O resultado ainda mais expressivo foi obtido pelo traço C75A50, que substituiu 25% de cimento e 50% de agregado miúdo, mostrou um aumento de 195% em relação ao traço de referência, mostrando que sua utilização como aglomerante em até 25% não comprometeu de forma relevante o desempenho dos traços. Em contrapartida, com substituição de 50% do cimento por cinza, na mistura CCP50 diminuiu 42% em relação ao traço de referência.

Com base nos resultados de resistência à compressão, foi possível estimar o consumo de cimento por MPa, no qual permite avaliar a eficiência de cada traço. O Gráfico 4 apresenta o consumo de cimento por m³ em função da resistência obtida.

Gráfico 4 - Consumo de cimento/m³ x MPa

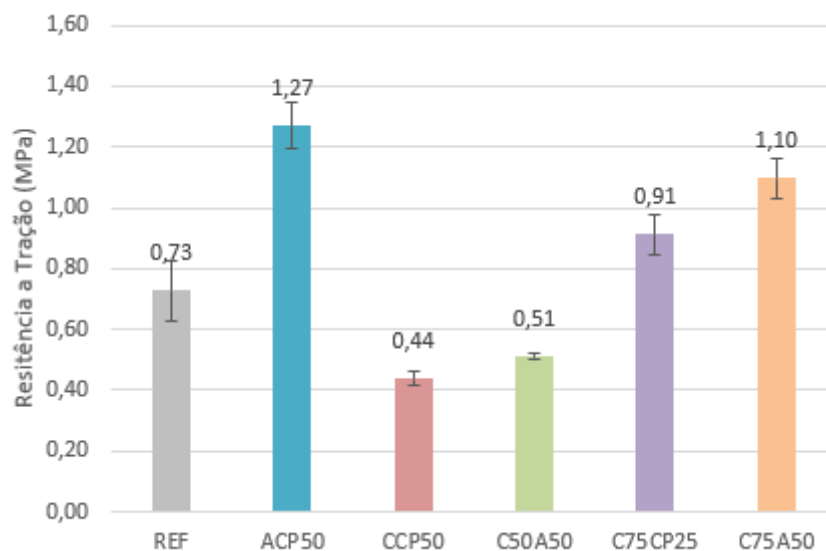
Fonte: Autora (2025).

A análise do gráfico mostra o consumo de cimento para gerar 1MPa. Evidenciando que o traço ACP50, que também apresentou a maior resistência a compressão conforme Gráfico 4, foi o mais eficiente, pois alcançou os maiores valores de resistência utilizando a menor quantidade de cimento.

3.5 Resistência à Tração na flexão

O Gráfico 5 a seguir apresenta os resultados do ensaio de Resistência à Tração na Flexão, com seus respectivos valores em MPa e desvio padrão.

Gráfico 5 - Resultados ensaio Resistência à Tração na Flexão



Fonte: Autora (2025).

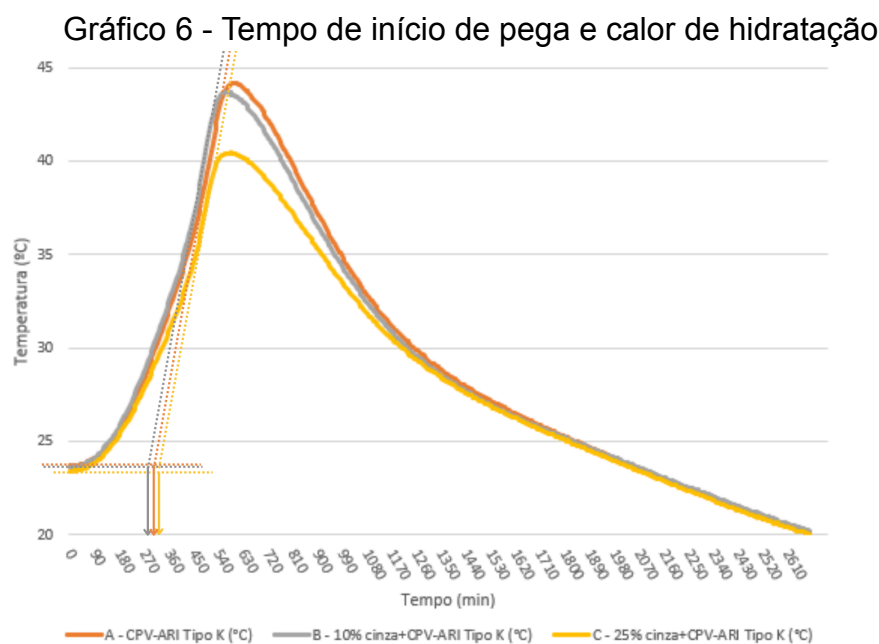
Os resultados de resistência à tração mantiveram uma coerência visual do gráfico em relação ao ensaio de compressão, ainda que com valores inferiores, uma

vez que as argamassas apenas apresentam resistência predominante à compressão.

Como no ensaio anterior, traços ACP50, CCP25 e C75A50 apresentaram ganhos de resistência em relação ao traço de referência. Entre eles, o traço ACP50 apresentou um maior ganho de resistência, atingindo 1,27 MPa, o que corresponde a um aumento de 174% em relação à referência, sendo 0,73 MPa.

3.6 Calorimetria

O Gráfico 6 abaixo representa as curvas calorimétricas A, B e C das misturas de pasta analisadas com seus respectivos tempos de início de pega e calor de hidratação.



Fonte: Autora (2025).

Com a análise do gráfico, observou-se que a curva B e C apresentaram tempos de início de pega maiores que o de referência, evidenciando que à medida que o teor de cinza pesada aumenta, o tempo de início de pega também aumenta (COSTA, 2023). Do mesmo modo, a mistura de 25% de cinza com cimento mostrou-se com um menor calor de hidratação comparado às demais pastas, indicando que temperaturas maiores aceleram o início da pega, enquanto temperaturas iniciais menores, contribuem para seu retardo (MULLER, 2023).

3.7 Pozolanidade e Massa Específica

Segundo a norma NBR 12653 (ABNT, 2014), para um material ser pozolânico deve atender a três requisitos. Neste estudo, foi feito o ensaio que determina a atividade pozolânica da cinza pesada com cal aos sete dias.

Para determinação da quantidade de cinza pesada utilizada para o ensaio de pozolanicidade, foi determinada a massa específica da cinza pesada moída por meio do frasco Le Chatelier e obtido o valor de 2,44 g/cm³, semelhante a (REPETTE *et al.*, 2011), no qual apresentou 2,40 g/cm³.

A Tabela 8 descreve os resultados do ensaio de Resistência à Compressão dos corpos de prova cilíndricos com seu Desvio Relativo Máximo (DRM).

Tabela 8 - Resultados Ensaio de pozolanicidade

Análises	Resultados	Limites Normativos
Resistência à Compressão (Média)	7,43 MPa	≥ 6 MPa
DRM	3,36 %	≤ 6 %

Fonte: Autora (2025).

De acordo com o limite normativo, para um material considerado pozolana, sua resistência a compressão deve ser ≥ 6 MPa, deste modo, observa-se que o resultado obtido atende um dos requisitos mínimos, indicando uma possível atividade pozolânica do material. No entanto, neste estudo não foram realizados os ensaios de Material retido na peneira 45 μ m e o índice de desempenho com cimento portland aos 28 dias, os quais são essenciais para confirmar se a cinza pesada atende aos critérios estabelecidos para ser classificada como material pozolânico.

4. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Este estudo avaliou a viabilidade técnica e ambiental da incorporação da cinza pesada proveniente da queima do carvão mineral em argamassas, investigou seu comportamento tanto como material cimentício suplementar quanto como agregado miúdo.

Do ponto de vista ambiental, a caracterização ambiental da cinza mostrou que o resíduo se enquadra como Classe II A, não perigoso e não inerte, mostrando que representa uma alternativa ambientalmente favorável em sua utilização em argamassas.

Quanto ao desempenho das matrizes cimentícias, a sua incorporação nas misturas influenciou tanto no estado fresco quanto no endurecido. No estado fresco, a trabalhabilidade foi afetada pelo aumento do teor de cinza, devido ao seu nível de finura, demandando uma maior quantidade de água e aditivo para alcançar a consistência adequada, corroborando com estudos analisados. No estado endurecido, os resultados de resistência à compressão e a tração mostraram que os corpos de prova ACP50, CCP25 e C75A50 apresentaram desempenho superior ao de referência, com destaque ao ACP50 que teve um aumento expressivo de resistência devido ao agregado utilizado estar na zona ótima dos limites estabelecidos pela norma. Já os traços com substituição parcial de cimento por cinza apresentaram redução de desempenho, porém sua substituição até 25% de cimento não comprometeu de forma relevante o desempenho dos traços.

Os resultados da calorimetria evidenciaram que o aumento no teor de cinza pesada na mistura reduz o tempo de início de pega, resultando em processos de pega mais lentos. Essa característica pode ser vantajosa em aplicações que demandam maior tempo de trabalhabilidade, embora possa limitar o seu uso em situações que exigem rápido ganho de resistência.

Do mesmo modo, a avaliação do comportamento da cinza pesada como material pozolânico indicou que, embora o ensaio de pozolanicidade tenha atendido

a um dos requisitos da norma, ainda há necessidade de realizar os ensaios complementares para sua confirmação como pozolana.

Diante dos resultados avaliados, conclui-se que a cinza pesada apresenta um maior potencial técnico para utilização como agregado miúdo em argamassas, podendo contribuir para utilização como agregado miúdo natural e para o gerenciamento mais sustentável dos resíduos da indústria carbonífera. No entanto, sua aplicação como material cimentício suplementar permanece possível, mas há necessidade de estudos adicionais.

Para trabalhos futuros, recomenda-se a realização do ensaio de análise química através de Espectrometria Fluorescência de Raios X (FRX) da amostra de cinza pesada, tal ensaio irá agregar valor para seu uso como material cimentício suplementar. Também para possibilidade de confirmação da cinza pesada como pozolana será necessário realizar os ensaios complementares da norma NBR 12653 (ABNT, 2014), sendo o ensaio de material retido na peneira 45 µm e o índice de desempenho com cimento portland aos 28 dias.

5. REFERÊNCIAS

AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA (ANEEL). **Capacidade de Geração de Energia Elétrica – Painel Interativo**. Disponível em: <https://app.powerbi.com/view?r=eyJrljoiNGE3NjVmYjAtNDZkZC00MDY4LTliNTItMTVkZTU4NWYzYzFmIiwidCI6IjQwZDZmOWI4LWVjYjYtNDZhMi05MmQ0LWVhNGU5YzAxNzBIMSIsImMiOiR9>. Acesso em: 06 jun. 2025.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE CARVÃO MINERAL (ABCS). **Relatório estatístico do setor carbonífero de Santa Catarina – 2022**. Criciúma: ABCS, 2022. Disponível em: https://abcs.net.br/wp-content/uploads/2023/11/dados_estatisticos_ano_2022.pdf. Acesso em: 06 jun. 2025.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 10004**: Resíduos Sólidos - Classificação. São Paulo: ABNT, 2004.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 12653**: Materiais Pozolânicos- Requisitos. São Paulo: ABNT, 2014.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 13276**: Argamassa para assentamento revestimento de paredes e tetos - Determinação do índice de consistência. São Paulo: ABNT, 2016.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 16541**: Argamassa para assentamento revestimento de paredes e tetos - Preparo da mistura para a realização de ensaios. São Paulo: ABNT, 2016.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 16738**: Cimento Portland - Determinação da resistência à compressão de corpos de prova prismáticos. São Paulo: ABNT, 2019.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 17054**: Agregados - Determinação da composição granulométrica - Método de Ensaio. São Paulo: ABNT, 2022.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5751**: Materiais Pozolânicos - Determinação da atividade pozolânica com cal aos sete dias. São Paulo: ABNT, 2015.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7211**: Agregados para concreto - Requisitos. São Paulo: ABNT, 2022.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7214**: Areia Normal para ensaio de cimento - Especificação. São Paulo: ABNT, 2015.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NM 23**: Cimento portland e outros materiais em pó - Determinação da massa específica. São Paulo: ABNT, 2000.

COSTA, Heloína *et al.* **Comportamento no estado fresco e no estado endurecido de pastas de cimentos álcali-ativados de cinza volante e de cinza pesada e suas características microestruturais**. Ambiente Construído, Porto Alegre, v. 23, n. 3, jul./set. 2023. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1590/s1678-86212023000300683>.

DIAMANTE GERAÇÃO DE ENERGIA LTDA. **Ficha de Informações de Segurança de Produto Químico - FISPQ**. Capivari de Baixo: Diamante Geração de Energia Ltda, 2020.

IRIGON, Paula Irigon de. **Reaproveitamento da cinza pesada de termelétrica a carvão mineral para obtenção de sílica gel**. Tese (Doutorado em Engenharia) – UFRGS, Escola de Engenharia, Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais, Porto Alegre, 2021.

MÜLLER, Anderson Augusto. **Estudo do efeito de aditivos na estabilização de argamassas com pós finos de subprodutos industriais**. Tese (Doutorado em Ciência e Engenharia de Materiais) – Universidade do Extremo Sul Catarinense – UNESC, Criciúma, 2023.

PADILHA, Lilian *et al.* **Produção de argamassas com substituição parcial de cimento e agregado por cinzas de carvão vapor**. Em: Encontro Nacional de aproveitamento de resíduos na construção, Porto Alegre, 2021.

REPETTE, *et al.* **Uso de cinza pesada na produção de concreto autoadensável**. Em: VI Congresso de Inovação Tecnológica em Energia Elétrica – CITENEL, Fortaleza: ANEEL, 2011.

RIBEIRO, Mateus *et al.* **Avaliação do desempenho de aditivos comerciais superplastificantes à base de policarboxilato nas propriedades mecânicas e microestruturais de pastas de cimento portland**. Revista Matéria, Rio de Janeiro, v. 25, n.4, 2020. DOI: 10.1590/S1517-707620200004.1203.

SILVA, *et al.* **Avaliação da aplicação de cinzas pesadas de termelétrica em blocos intertravados de concreto para pavimentos**. Revista Matéria, v. 25, n. 1, 2020. DOI: 10.1590/S1517-707620200001.0895.