

SUBSTITUIÇÃO PARCIAL DO CIMENTO PORTLAND POR CINZAS DE MADEIRA NO CONCRETO

PARTIAL REPLACEMENT OF PORTLAND CEMENT WITH WOOD ASH IN CONCRETE

José Henrique da Silva¹
Romildo Morant de Holanda²

RESUMO

Este trabalho analisou o comportamento físico e mecânico do concreto com substituição volumétrica parcial do cimento Portland por cinzas de madeira, provenientes da combustão em caldeiras industriais de lavanderia de jeans, em Caruaru-PE. As cinzas, peneiradas em malha #200 (75 μm), foram incorporadas em teores de 10%, 20% e 40%. A metodologia incluiu a caracterização dos materiais, definição dos traços pelo método ABCP e ensaios de consistência, massa específica e resistência à compressão. Os resultados mostraram que a menor densidade das cinzas justificou a substituição volumétrica e que sua incorporação reduziu a trabalhabilidade, exigindo ajustes na relação água/cimento. Quanto à resistência, verificou-se queda proporcional ao aumento do teor de cinza, com desempenho satisfatório até 20% de substituição. O estudo evidencia a viabilidade do uso das cinzas como material suplementar, contribuindo para reduzir o consumo de cimento e os impactos ambientais da construção civil.

Palavras-chave: cinzas de madeira; concreto; cimento portland.

ABSTRACT

This study analyzed the physical and mechanical behavior of concrete produced with partial replacement of Portland cement by wood ash, derived from biomass combustion in industrial boilers of denim laundry, in Caruaru-PE, Brazil. The ashes, sieved through a #200 mesh (75 μm), were incorporated into concrete mixtures at replacement levels of 10%, 20%, and 40%. The methodology included material characterization, mix design according to the Brazilian Portland Cement Association (ABCP) method, and tests on consistency, specific mass, and compressive strength. Results indicated that the lower density of the ashes justified volumetric replacement and that their incorporation reduced workability, requiring adjustments in the water-to-cement ratio. Compressive strength decreased proportionally with higher ash content, with satisfactory performance observed up to 20% replacement. The findings demonstrate the feasibility of using wood ash as a supplementary cementitious material, contributing to reduced Portland cement consumption and mitigation of environmental impacts in the construction industry.

Keywords: wood ash; concrete; portland cement.

¹ Bacharelado em Engenharia Civil pela Universidade Federal Rural de Pernambuco – Unidade Acadêmica do Cabo de Santo Agostinho, 2025.

² Doutor em Recursos Naturais pela Universidade Federal de Campina Grande.

INTRODUÇÃO

Na cidade de Caruaru, localizada no Agreste do estado de Pernambuco, há uma forte atividade de lavanderias de *jeans*, ramo industrial estritamente ligado ao Arranjo Produtivo Local (APL) do Agreste pernambucano, que movimenta a economia da região.

Guimarães *et al.* (2018) destacaram que o APL conta com 175 lavanderias industriais, responsáveis pelo processamento mensal de aproximadamente 4,8 milhões de peças de jeans, cerca de 5,3 mil toneladas do produto. Essas unidades estão mais presentes nas cidades de Caruaru, Toritama, Riacho das Almas, Vertentes e Surubim, sendo Caruaru responsável por 33% desse total.

Ribeiro e Tavares (2018) descreveram as lavanderias industriais como a parte do setor têxtil encarregada de realizar o acabamento e criar efeitos visuais nos tecidos, modificando a textura e o formato das peças para atender às especificações estabelecidas pelos profissionais da moda. Na operação das lavanderias de *jeans*, as caldeiras são essenciais, sendo utilizadas em diversas etapas do processo produtivo, como a lavagem, tingimento e secagem das peças.

Na região de Caruaru, Nascimento *et al.* (2016) observaram que as lavanderias utilizam majoritariamente caldeiras cuja fonte energética são as lenhas, sendo a principal delas a Algaroba (*Prosopis juliflora*), dada a abundância da espécie na região. A combustão da lenha nas caldeiras resulta também em resíduos, como é o caso das cinzas, que, como apontado pelos autores, têm sido descartadas de modo inadequado no meio ambiente.

Os polos gesso e de cerâmica de Pernambuco também são potenciais geradores de cinzas, por também utilizarem tradicionalmente a lenha como material combustível, conforme Pires (2016). Melo (2012) estimou que uma lavanderia de médio porte pode gerar mensalmente 6,5 toneladas de cinzas, evidenciando uma produção considerável do resíduo, que necessita de uma maior atenção em torno da sua destinação.

Em paralelo, a indústria da construção civil é um dos ramos que mais geram

impactos ambientais, seja pelo elevado consumo de recursos naturais e energia, seja pela grande geração de resíduos. Por outro lado, Santos (2015) destaca que o setor também é capaz de absorver grande parte dos seus resíduos, incorporando-os nos materiais cimentícios.

Dados do SNIC (2023) – Sindicato Nacional da Indústria do Cimento – indicam que 62,2 milhões de toneladas de cimento Portland foram consumidos no país em 2023, no entanto, a indústria do cimento brasileira vem se destacando no cenário mundial como uma das mais sustentáveis, reduzindo em 17% suas emissões de CO₂, indo de 700 Kg.CO₂/t.cimento para 580 Kg.CO₂/t.cimento, enquanto a média mundial é de 608 Kg.CO₂/t.cimento. Tal efeito tem se dado por uma maior eficiência energética, onde as fábricas vêm substituindo gradativamente o coque de petróleo por combustíveis alternativos, como resíduos diversos e biomassas, e reduzindo a intensidade térmica de seus fornos em 14%, indo de 4.214 MJ/t.clinker para 3.624 MJ/t.clinker. Além disso, aumentaram de 16% para 29% o uso de adições no processamento do cimento Portland (escória, cinza volante, *filler* calcário, argila calcinada e outros), reduzindo a relação clínquer/cimento de 84% para 71% e atuando diretamente na redução do consumo de recursos naturais não renováveis.

O material de construção mais consumido do mundo é o concreto, cuja matriz é o cimento Portland e a produção deste representa 8% das emissões de CO₂ do planeta. Conforme o acordo de Paris, até 2030, a indústria do cimento deverá reduzir as emissões de gases de efeito estufa em, no mínimo, 16%, investindo em tecnologias para captura e armazenamento de carbono, contudo, a demanda de produtividade do setor em países emergentes, que enfrentam a pressão do crescimento populacional, representa um desafio para o alcance das metas de sustentabilidade, obrigando o setor a buscar materiais que substituam gradativamente o cimento. A mitigação dessas emissões pode se dar pela substituição parcial do clínquer por materiais alternativos, como a escória de alto forno e as cinzas volantes, que tem um potencial de reduzir as

emissões em cerca de 0,2 GT (gigatoneladas) de CO₂ até 2050; valor que pode chegar até 1,5 GT, caso seja possível substituir cerca de 70% do uso de clínquer (Lehne e Preston, 2020).

As cinzas oriundas da biomassa apresentam composição variável, podendo conter teores significativos de cálcio, silício e outros elementos. No âmbito dos sistemas cimentícios, aquelas com maior concentração de silicatos tendem a manifestar atividade reativa, configurando-se como potenciais materiais pozolânicos alternativos. Em contrapartida, as cinzas predominantemente constituídas por compostos calcários revelam caráter inerte, sendo mais adequadas à função de material de preenchimento (Nascimento *et al.*, 2019).

Silva *et al.* (2015) destacam que, embora o emprego tradicional das cinzas esteja associado à correção de solos, tais resíduos também apresentam viabilidade para utilização em matrizes cimentícias. Contudo, esse potencial depende de fatores determinantes, como a finura das partículas, o tipo de biomassa utilizada e as condições de combustão, incluindo as características da caldeira e a temperatura aplicada.

Nascimento (2014) conduziu uma investigação acerca da utilização de cinzas de biomassa de algaroba, provenientes do resíduo de combustão gerado em caldeira industrial de uma lavanderia, em argamassas de revestimento. O resíduo foi previamente submetido a peneiramento em malha #200 (75 µm), sendo posteriormente incorporado à matriz da argamassa em substituição parcial ou total à cal hidratada, nas proporções de 25%, 50%, 75% e 100%. Os resultados obtidos evidenciaram que nenhuma das taxas de substituição avaliadas ocasionou prejuízos relevantes às propriedades físico-mecânicas ou ao desempenho geral da argamassa. Além disso, a análise química das cinzas revelou elevado teor de carbonato de cálcio (CaCO₃), indicando predominância de compostos calcários na sua composição.

Melo (2012) desenvolveu um estudo acerca da utilização de cinzas de biomassa de algaroba como material cimentício suplementar em argamassas de revestimento. As amostras foram coletadas em distintas

zonas térmicas da caldeira industrial de uma lavanderia, especificamente na região superior e na base, com o objetivo de analisar a influência da origem do resíduo sobre sua composição química e potencial reatividade. O material particulado foi previamente submetido a peneiramento em malha #200 (75 µm) e, posteriormente, incorporado às argamassas em substituição mássica parcial ao cimento Portland, nas proporções de 10%, 20%, 30% e 40%. Os resultados experimentais evidenciaram que a adição de ambos os tipos de cinza não ocasionou perdas significativas nas propriedades físico-mecânicas nem comprometeu a durabilidade do compósito. Tal desempenho foi atribuído, em grande medida, ao efeito *filler*, decorrente do preenchimento de vazios proporcionado pelas partículas finas das cinzas, o que contribuiu para a densificação da matriz e para a manutenção das características de desempenho da argamassa.

Pires (2016) conduziu um estudo visando a formulação de argamassas de emboço incorporando cinzas de biomassa de algaroba. A metodologia envolveu a substituição parcial mássica do cimento Portland pelas cinzas, nas taxas de 5%, 10% e 20%. A investigação revelou que a taxa de incorporação de 5% permitiu a manutenção das propriedades de desempenho da argamassa em patamares análogos à formulação de referência (convencional). Por outro lado, a dosagem de 10% induziu variações sutis nas características físico-mecânicas, contudo, sem que houvesse um comprometimento da funcionalidade ou da performance técnica do compósito final.

Melo (2012) investigou o uso da Cinza Residual de Lenha de Algaroba (CRLA) em argamassas. O estudo consistiu na substituição parcial do cimento Portland pela CRLA, previamente beneficiada por peneiramento em malha #200, em cinco taxas de dosagem mássica: 5%, 7%, 10%, 12% e 15%. A análise geral indicou que a incorporação da CRLA em níveis de até 10% não resultou em comprometimento significativo das propriedades de estado fresco ou características físico-químicas do compósito, entretanto, em relação ao desempenho estrutural, os ensaios mecânicos

revelaram uma sensibilidade à dosagem. O desempenho estrutural satisfatório foi observado exclusivamente no traço com 5% de substituição de cimento por CRLA.

Lima (2019) investigou o desempenho do Concreto Autoadensável (CAA) utilizando cinzas de biomassa de algaroba. A pesquisa avaliou o efeito da substituição parcial do *filler* calcário por estas cinzas nas proporções mássicas de 25%, 50% e 75%. A análise dos resultados demonstrou que a taxa de incorporação de 50% se configurou como a dosagem ótima. Esta proporção foi a que proporcionou os melhores índices de desempenho, destacando-se pela melhoria significativa na resistência mecânica e no incremento da durabilidade do compósito, o que pode ser atribuída à sua ação como *filler* (melhorando o empacotamento do CAA).

Segundo Nascimento *et al.* (2016), a incorporação de cinzas de lenha de algaroba ao concreto, nas proporções de 5%, 10% e 15%, mostrou-se viável quando o material é previamente peneirado em malha #200. Os resultados indicaram que, além de minimizar a segregação, a adição de 5% de cinzas contribuiu para o aprimoramento das resistências à compressão e à tração.

Vaske (2012) realizou uma investigação sobre o aproveitamento de cinzas de biomassa de eucalipto (*Eucalyptus spp.*), obtidas como resíduo da combustão em uma caldeira industrial, para uso como adição mineral na formulação de concreto. O estudo avaliou a substituição mássica parcial do cimento Portland pelas cinzas nas proporções de 15%, 30% e 45%. A análise experimental determinou que a taxa de substituição de 15% representou a dosagem mais eficiente, resultando em melhorias significativas nas propriedades físico-mecânicas.

Resende (2013) investigou o desenvolvimento de um material cimentício compósito mediante a substituição parcial do cimento Portland por cinzas de cavaco de eucalipto, nas taxas mássicas de 5%, 10% e 15%. O estudo focou na avaliação da influência de três métodos distintos de beneficiamento sobre a reatividade das cinzas: *in natura*, moídas por 12 horas em moinho de bolas e calcinadas a 600 °C, sendo cada uma testada individualmente. Os resultados de

desempenho mecânico revelaram que a cinza *in natura* promoveu a manutenção de um desempenho satisfatório quando empregada na dosagem de 5%. Em contraste, a cinza calcinada não apresentou melhorias significativas que justificassem a aplicação do processo de ativação térmica. A cinza submetida à moagem, por sua vez, demonstrou o melhor desempenho, evidenciando um comportamento pozolânico, provavelmente resultante da redução do tamanho de partícula que potencializa a atividade reativa.

Diante do exposto, o objetivo do presente trabalho foi avaliar o comportamento físico e mecânico do concreto composto a partir da substituição parcial do cimento Portland por cinzas de madeira em diferentes teores, visando reduzir o consumo de cimento na produção do compósito. Como objetivos específicos: caracterizar os componentes do concreto; calcular os traços do concreto para os critérios adotados; e realizar ensaios físicos e mecânicos nos concretos desenvolvidos para validação dos critérios técnicos.

METODOLOGIA

Para o presente trabalho, a metodologia adotada foi descrita nos subtópicos apresentados a seguir:

Coleta das cinzas

O fornecimento das cinzas foi realizado pela lavanderia Nossa Senhora do Carmo, localizada na cidade de Caruaru-PE, onde foi aplicada uma entrevista com a gestão da empresa, a fim de melhor entender os serviços prestados pela lavanderia, as fontes energéticas que abastecem o empreendimento, o maquinário utilizado na produção e a gestão dos resíduos associados à produção.

Foi verificado que as caldeiras eram alimentadas com a queima de biomassa, que, conforme informações repassadas pela gestão da lavanderia, era composta por 70% de lenha de algaroba adquirida na própria região e 30% de madeiras recicladas, como resíduos de movelaria.

As cinzas foram coletadas diretamente do cinzeiro das caldeiras, totalizando 05 sacos do tipo r fia com 25 Kg do material cada.

Caracteriza o física das cinzas e do cimento Portland

As cinzas coletadas foram levadas ao Laboratório de Materiais da Constru o da UFRPE-Sede, onde foram transferidas para sacos plásticos herméticos, a fim de evitar o contato com umidade, e submetidas ao peneiramento manual, com peneira de malha 200 (abertura de 75  m), sendo aproveitado apenas o material passante, correspondendo   granulometria do cimento Portland.

As cinzas já peneiradas foram submetidas ao ensaio de massa unitária compactada, conforme metodologia proposta por Cunha (2020).

O procedimento experimental utilizou uma proveta de 100 mL, um agitador elétrico e uma balança analítica (0,001 g de resolu o). Inicialmente, a massa da proveta vazia foi registrada; em seguida, as cinzas foram adicionadas   proveta e submetidas   agita o por dois minutos, a uma frequência de 10 Hz, a fim de adensar o resíduo. O processo de adi o e adensamento das cinzas foi repetido até que o material atingisse exatamente a marca de 100 mL da proveta. Por fim, o conjunto proveta + cinzas adensadas foi novamente pesado.

Em rela o ao cimento Portland, foi utilizado no experimento o CP II-Z, classe 32, da marca Cimento Elizabeth, obtido no comércio local, que, conforme a ficha técnica do produto, possuía massa específica de 3,02 g/cm³. O cimento também foi submetido   mesma metodologia para determina o da massa unitária compactada.

Para os dois materiais, a massa unitária foi determinada a partir da equa o 1:

$$\rho_{unit} = \frac{m_2 - m_1}{V} \quad (1)$$

Onde,

ρ_{unit} : massa unitária do material (Kg/m³);

m_1 : massa da proveta vazia (Kg);

m_2 : massa da proveta + material (Kg);

V: volume da proveta (m³).

Caracteriza o física dos agregados

A massa específica da areia foi determinada conforme a metodologia proposta pela NBR NM 52 (ABNT, 2009a), sendo utilizado no ensaio os seguintes instrumentos: molde tronco c nico; haste de compacta o metálica; balança com precisão de 0,001 g; Erlenmeyer com capacidade de 500 cm³; e estufa a 110 C.

O valor da massa específica da areia foi obtido através da equa o 2:

$$d_a = \frac{m}{(V - V_a) - \frac{m_s - m}{\rho_a}} \quad (2)$$

Onde,

m: massa seca da areia após estufa (g);

V: volume do frasco (cm³);

V_a: volume de água adicionada ao frasco (cm³);

m_s: massa da amostra saturada superfície seca (g);

ρ_a : massa específica da água (g/cm³).

A massa específica da brita foi determinada conforme a metodologia proposta pela NBR NM 53 (ABNT, 2009b), sendo utilizado no ensaio os seguintes instrumentos: balança com resolu o de 0,001 g; cesto metálico com abertura máxima de malha de 3,35 mm; tanque; e estufa a 110 C.

O valor da massa específica da brita foi obtido através da equa o 3:

$$d_b = \frac{m}{m_s - m_a} \quad (3)$$

Onde,

m: massa do agregado seco (g);

m_s: massa do agregado na condi o saturada superfície seca (g);

m_a: massa do agregado em água (g).

A massa unitária dos agregados graudo e miudo foi determinada pela metodologia da NBR NM 45 (ABNT, 2006). Foram utilizados no ensaio os seguintes equipamentos: balança com resolu o de 0,001 g; balde, utilizado como recipiente cilíndrico; term metro; estufa; e placa de vidro para calibra o.

O valor da massa unitária foi determinado pela equação 4:

$$\rho_{ar} = \frac{m_{ar}-m_r}{V} \quad (4)$$

Onde,

ρ_{ap} : massa unitária do agregado (Kg/m³);
 m_{ar} : massa do recipiente + agregado (Kg);
 m_r : massa do recipiente vazio (Kg);
V: volume do recipiente (m³).

A granulometria dos agregados foi determinada conforme a NBR NM 248 (ABNT, 2003), observando a sequência de peneiras da série normal para cada tipo de agregado.

O teor de umidade da areia foi determinado a partir da metodologia da NBR 9775 (ABNT, 2012), sendo utilizados no ensaio os seguintes equipamentos: balança com resolução de 0,001 g; e o frasco de Chapman.

O valor do teor de umidade foi obtido a partir da equação 5:

$$h = \frac{[500-(V-200)*\gamma]}{(V-700)*\gamma} * 100 \quad (5)$$

Onde,

h: teor de umidade (%);
V: volume de areia lido no frasco de Chapman (mL);
 γ : densidade na condição saturada de superfície seca, conforme o ensaio de massa específica da areia (g/mL).

Determinação dos traços do concreto

Seguindo a NBR 8953 (ABNT, 2015a), foi produzido um concreto convencional de classe C30, adotado como concreto padrão para fins comparativos. Foram desenvolvidos concretos com substituição volumétrica do cimento por 10%, 20% e 40% de cinzas, chamados, respectivamente, de T10, T20 e T40.

O traço padrão do concreto, chamado de T0, foi definido conforme o método da Associação Brasileira de Cimento Portland – ABCP, por este ser baseado nos tipos de agregados mais utilizados no Brasil (RODRIGUES, 1995). Nesse sentido, para o

estudo da dosagem e o ajuste do traço, foi levado em consideração a condição “A” de preparo do concreto, estabelecida na NBR 12655, que considera as medidas dos componentes em massa e corrige a quantidade de água na dosagem descontando a umidade dos agregados (ABNT, 2015b).

Com a condição “A” de preparo, para efeito de cálculo de resistência de dosagem, foi considerado o desvio padrão de 4 MPa. Conforme a expressão dada pela norma, $f_{cmj} = f_{ckj} + 1,65*S_d$, onde a resistência característica do concreto à compressão aos 28 dias (f_{ckj}) escolhida foi de 30 MPa e o desvio padrão da dosagem (S_d) foi de 4 MPa, a resistência média da dosagem (f_{cmj}) obtida foi de 36,60 MPa, que, conforme a curva de Abrams, a relação água/cimento (a/c) para esse valor corresponde a 0,45.

Mistura do concreto, determinação do abatimento e produção dos corpos de prova

Os traços foram misturados conforme a NBR 12821 (ABNT, 2009c), utilizando uma betoneira com capacidade de 120 L.

Foi também adotada a classe de abatimento S50, conforme a NBR 8953 (ABNT, 2015a), onde o intervalo de abatimento aceito está entre 50 mm e 100 mm. No presente trabalho, foi adotado o valor padrão de 50 mm de abatimento, com tolerância de 10 mm para mais e para menos.

Após a mistura, o ensaio de abatimento se deu conforme o método do tronco cônico, metodologia descrita na NBR NM 67 (ABNT, 1998), sendo utilizados: base metálica, molde de tronco de cone metálico, funil metálico e haste de adensamento metálica.

Com a validação dos concretos desenvolvidos, foram moldados 26 corpos de prova para cada traço conforme a NBR 5738 (ABNT, 2016), utilizando moldes cilíndricos de 10 x 20 cm, untados internamente com desmoldante.

Após 24h nos moldes, os corpos de prova foram desmoldados e alocados em tanque com água para realização da cura úmida por 28 dias, conforme a NBR 5739 (ABNT, 2018).

Determinação de resistência à compressão do concreto

Após a cura, foi utilizada uma prensa manual hidráulica, de marca Pavitest/Contenco, com capacidade para 100 toneladas e calibrada pela empresa TECOMAT, para determinação da resistência à compressão dos corpos de prova dos concretos desenvolvidos.

As amostras tiveram suas extremidades niveladas manualmente, com o uso de lixas, as suas dimensões foram aferidas com utilização de paquímetro e cabeçotes revestidos com discos de neoprene foram colocados nas extremidades como preparação para o rompimento.

Para cada traço desenvolvido foram rompidos 22 corpos de prova e a resistência à compressão destes foi obtida através da equação 6:

$$f_c = \frac{4F}{\pi D^2} \quad (6)$$

Onde,

f_c : resistência à compressão (MPa);

F: força máxima alcançada (N);

D: diâmetro do corpo de prova (mm).

Conforme a NBR 12655, os 22 corpos de prova foram divididos em 11 pares, os quais foram chamados de exemplares, onde, para efeito de cálculo, a resistência característica do exemplar foi considerada o maior valor de resistência do par.

Já a resistência característica do traço foi calculada descartando o exemplar de maior resistência de cada traço e calculando a média apenas da metade dos exemplares considerados, porém, entre aqueles que apresentaram os menores valores de resistência.

Determinação da absorção e massa específica do concreto

Para determinação da absorção e massa específica do concreto, foram utilizados 04 corpos de prova para cada traço, seguindo os procedimentos da NBR 9778 (ABNT, 2009d).

Os valores de massa específica foram obtidos utilizando a equação 7:

$$\rho_r = \frac{m_s}{m_i - m_s} * 1000 \quad (7)$$

Onde,

m_s : massa da amostra seca em estufa (Kg);

m_i : massa da amostra saturada imersa (Kg).

Os resultados da absorção foram determinados a partir da equação 8:

$$A = \frac{m_{sat} - m_s}{m_s} * 100 \quad (8)$$

Onde,

A: absorção (%);

m_{sat} : massa da amostra saturada após imersão (Kg);

m_s : massa da amostra seca em estufa (Kg).

RESULTADOS E DISCUSSÕES

Nesta seção, serão apresentados os principais resultados e discussões sobre o trabalho, divididos em subtópicos.

Massa unitária compactada

As massas unitárias do cimento Portland e da cinza de madeira foram obtidas através do método descrito na seção 2.2. Para o cimento foi obtida uma massa unitária na ordem de 1220 Kg/m³ e 809 Kg/m³ para a cinza de madeira.

Observou-se que a cinza é um material particulado com menor densidade em relação ao cimento, justificando a substituição volumétrica do cimento pela cinza ao invés da substituição em massa, uma vez que a substituição em massa exigiria um grande volume de cinzas para ocupar o teor de cimento nas porcentagens de substituições estabelecidas (10, 20 e 40%).

Este grande teor de cinzas poderia prejudicar as propriedades do material, visto que o valor da massa unitária serviu para o cálculo da dosagem do concreto, sendo possível determinar o consumo do aglomerante no traço a partir dele.

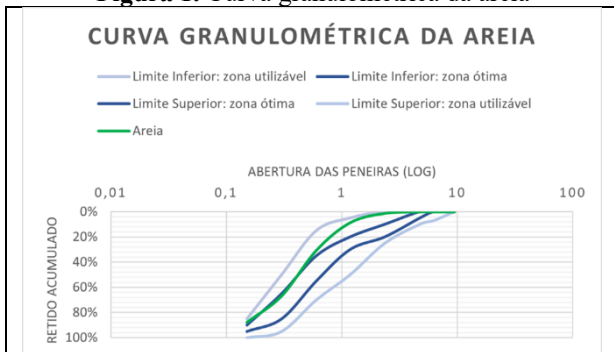
Caracterizações do agregado miúdo

A massa específica encontrada para a areia foi de $2,52 \text{ g/cm}^3$, o que equivale a 2520 Kg/m^3 . O valor encontrado está de acordo com Meier (2011) e Metha e Monteiro (2014), que identificaram a faixa de variação da massa específica da areia entre 2500 e 2700 Kg/m^3 .

A massa unitária obtida foi de $1372,72 \text{ Kg/m}^3$, valor intermediário entre o valor característico dos agregados leves (até 1120 Kg/m^3) e os pesados (2080 Kg/m^3), conforme Siqueira (2008). O valor da massa unitária da areia influencia diretamente na determinação do consumo do agregado no traço.

A curva granulométrica da areia utilizada no estudo, conforme a figura 1, apontou o material com granulometria fina, devido estar entre as zonas ótima e utilizável dos limites inferiores. O módulo de finura obtido foi de $1,95$, estando de acordo com Hagemann (2011), que afirma que o módulo de finura da areia fina varia entre $1,71$ e $2,85$, e o intervalo do módulo de finura para areia fina previsto em norma ($1,55$ a $2,20$). A dimensão máxima característica foi de $2,36 \text{ mm}$.

Figura 1. Curva granulométrica da areia



Fonte: elaborado pelo próprio autor.

Após ensaio, o teor de umidade da areia foi apontado em 2% , sendo, portanto, descontado do teor de água do traço do concreto.

Caracterizações do agregado graúdo

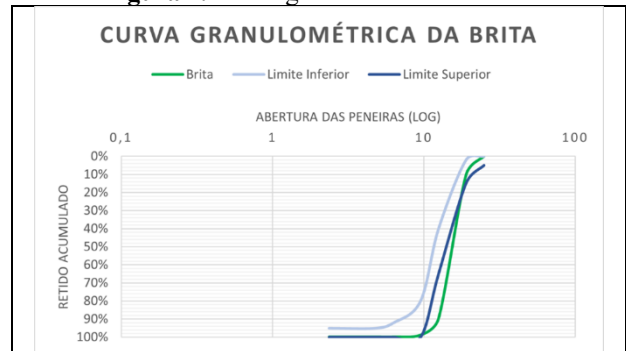
A massa específica obtida para a brita em questão foi de $2,67 \text{ g/cm}^3$, valor próximo aos $2,64 \text{ g/cm}^3$ encontrados por Silva Júnior e Martinelli (2014).

Já a massa unitária encontrada foi de $1483,30 \text{ Kg/m}^3$, valor com proximidade ao valor também obtido por Silva Júnior e Martinelli (2014), sendo este de 1510 Kg/m^3 .

Na composição granulométrica da brita, o módulo de finura obtido foi de $7,09$ e a dimensão máxima característica foi de 25 mm , correspondente à brita do tipo 2.

Considerando os limites previstos em norma para a brita do tipo 2, a curva granulométrica da brita ensaiada, conforme a figura 2, correspondeu ao tipo indicado.

Figura 2. Curva granulométrica da brita



Fonte: elaborado pelo próprio autor.

Determinação do consumo dos componentes do concreto

Conforme o método ABCP, os consumos dos componentes do concreto foram calculados.

O consumo aproximado de água (C_a) foi determinado através da relação entre o abatimento do tronco de cone estabelecido (50 mm) e a dimensão máxima característica do agregado graúdo (25 mm). O valor obtido foi de 190 L/m^3 .

A partir da relação entre o consumo de água e a relação a/c obtida ($0,45$), o consumo de cimento (C) no traço foi determinado em $422,22 \text{ Kg/m}^3$.

Com a relação entre o módulo de finura da areia e a dimensão máxima característica da brita, foi possível determinar o volume de brita por metro cúbico de concreto. A multiplicação do volume da brita pela sua massa unitária resultou no valor do consumo de brita (C_b), correspondente a $1149,56 \text{ Kg/m}^3$.

Para o consumo de areia (C_m), inicialmente foi definido o volume de areia para um metro cúbico de concreto, a partir da

relação entre os consumos de cimento, água e brita pelas suas respectivas massas específicas, e posteriormente multiplicando o volume pela massa específica da areia, dando o valor de 609,84 Kg/m³.

Obtenção da dosagem do concreto

Conforme o método ABCP, o traço unitário do concreto foi obtido através da relação entre o consumo dos demais componentes do concreto pelo consumo de cimento.

O traço unitário é composto pela sequência padrão cimento:areia:brita:água, onde foi obtido, respectivamente, os valores de 1:1,44:2,72:0,45.

Considerando que o saco comercial de cimento é de 50 Kg, o traço em massa do concreto é a multiplicação do traço unitário por 50, onde foi obtido os valores de 50:72:136:22,5.

Com a massa de cada componente, fazendo uma relação com suas respectivas massas específicas, foi possível obter o volume real de cada componente na mistura do concreto para um saco comercial de cimento.

Com o volume do molde de corpo de prova igual a 0,0016 m³, relacionando com o volume real de cada componente, foi possível obter a massa necessária de cada componente para moldar um corpo de prova de concreto. Os valores obtidos foram multiplicados pela quantidade total de corpos de prova definidos na metodologia (26 corpos de prova cilíndricos).

Diante da umidade da areia, o teor de água das dosagens foi descontado em 2%, enquanto o teor de cimento dependeu do teor de cinza no traço.

A massa de cimento obtida para moldar o total de corpos de prova por traço foi relacionada com a massa unitária do próprio cimento e o valor resultante foi multiplicado por cada teor de cinza estabelecido na metodologia (0%, 10%, 20% e 40%), com isso, foram obtidos os volumes de cimento para cada traço.

Tais volumes multiplicados pela massa unitária da cinza resultaram na massa de cinza necessária para cada traço, enquanto

a massa real do cimento para cada traço foi obtida da multiplicação entre a massa unitária do cimento pela porcentagem real de cimento em cada traço (100%, 90%, 80% e 60%).

As dosagens dos traços obtidas podem ser observadas na tabela 1.

Tabela 1 - Dosagem para produção dos corpos de prova cilíndricos

Traço	Teor (Kg)				
	Cimento	Areia	Brita	Cinza	Água
T0	20	28,80	54,40	0	8,82
T10	18	28,80	54,40	1,33	8,82
T20	16	28,80	54,40	2,65	8,82
T40	12	28,80	54,40	5,30	8,82

Fonte: elaborado pelo próprio autor.

Avaliação da consistência do concreto

Conforme a metodologia, a classe de consistência do concreto foi definida como S50, isto é, o abatimento do concreto no estado fresco seria de 50 mm, com tolerância de variação de 10 mm para mais ou para menos.

Nesse sentido, na execução do ensaio, observou-se que os traços com adição de cinza apresentaram menor trabalhabilidade e baixo abatimento do concreto no estado fresco, fazendo com que fosse aumentado o teor de água nas misturas com cinza, a fim de respeitar a condição proposta.

Como exemplificado na tabela 2, a modificação da relação a/c dos traços com cinza proporcionou os seguintes abatimentos:

Tabela 2 - Abatimento do concreto fresco nos traços com acréscimo de água

Traço	Relação a/c	Abatimento (mm)
T0	0,45	50
T10	0,52	45
T20	0,59	50
T40	0,79	40

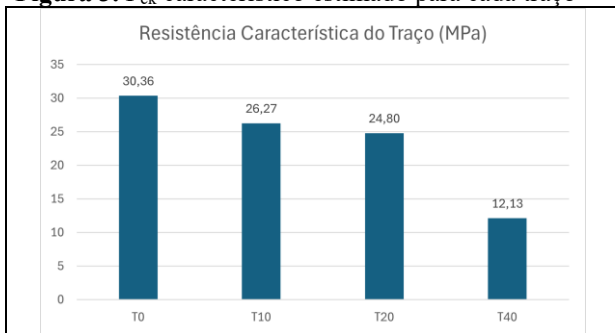
Fonte: elaborado pelo próprio autor.

Nesse caso, a diminuição na fluidez do concreto fresco se deu pelo acréscimo de finos na mistura, como também observou Nascimento *et al.* (2016). Contudo, como mostrou Bauer (2008), a relação entre o teor de água e o teor de sólidos da mistura é o principal indicador de consistência.

Avaliação da resistência à compressão do concreto

Conforme a figura 3, observou-se que a resistência característica do traço se comportou de forma inversa proporcional ao acréscimo do teor de cinza no traço, onde a redução de resistência à compressão em relação ao traço padrão (T0) foi de 13,5% para o T10, 18,3% para o T20 e 60% para o T40.

Figura 3. F_{ck} característico estimado para cada traço



Fonte: elaborado pelo próprio autor.

Resende (2013) e Nascimento *et al.* (2016) verificaram que a substituição do cimento pela cinza de eucalipto e algaroba, respectivamente, apresentou acréscimo de resistência para o teor de 5%, enquanto teores a partir de 10% resultaram em perda de resistência.

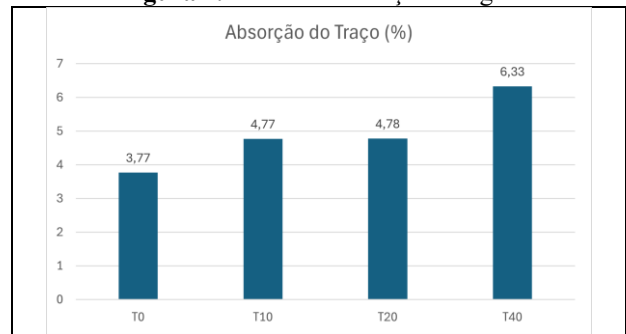
Gluitz e Marafão (2013) observaram que a cinza tem baixos teores de silício em sua composição, o que implica em baixa formação de silicatos durante a hidratação do concreto, que atribuem resistência ao material durante a cura. Nesse sentido, Lima (2019) observou que pela característica inerte da cinza, sua melhor aplicação nos sistemas cimentícios seria como *filler* calcário.

Avaliação das propriedades físicas do concreto

Conforme a figura 4, a média da absorção dos 4 corpos de prova por traço apontou, levando em consideração do desvio padrão, que o traço T0 se diferenciou estatisticamente dos demais traços, apresentando o menor valor de absorção, enquanto os traços T10 e T20 não apresentaram diferenças estatísticas entre si e

o traço T40 apresentou o pior valor de absorção, confirmando a influência do acréscimo de água nas propriedades do concreto.

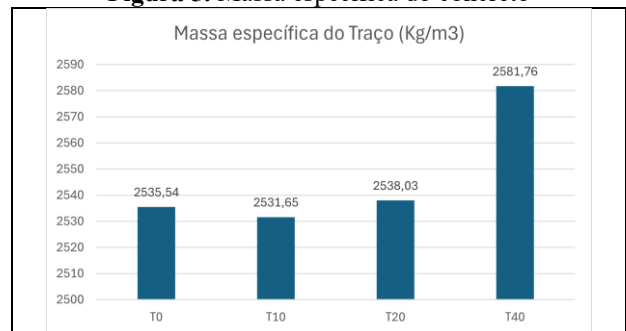
Figura 4. Índice de absorção de água



Fonte: elaborado pelo próprio autor.

Em relação à massa específica dos traços, os traços T0, T10 e T20 não apresentaram diferenças significativas em suas médias, enquanto o traço T40 apresentou a maior massa específica, indicando a influência da cinza no acréscimo de massa do material, conforme a figura 5. No entanto, conforme a NBR 8953, todos os traços foram classificados como concreto normal, por estarem dentro do intervalo de massa específica correspondente à classificação.

Figura 5. Massa específica do concreto



Fonte: elaborado pelo próprio autor.

CONCLUSÃO

A caracterização físico-química dos constituintes demonstrou ser um procedimento fundamental para o estabelecimento da dosagem racional do compósito. Esse rigor analítico garantiu a otimização do consumo de materiais, promovendo a sustentabilidade e a eficiência técnica do sistema.

Neste contexto, a cinza de madeira exibe um elevado teor de carbonato de cálcio

(CaCO₃), o que confere similaridade à composição química de materiais cimentícios e ao *filler* calcário. Ao se obter uma granulometria refinada (próxima à do cimento), este resíduo pode ser efetivamente aproveitado como adição mineral inerte em sistemas cimentícios. Sua função primordial é o preenchimento de vazios (efeito *filler*), o que resulta em um melhor empacotamento granular e impacta positivamente as propriedades mecânicas e a microestrutura do material processado no estado endurecido.

A substituição volumétrica do cimento pela cinza resultou em uma redução da consistência e da trabalhabilidade do concreto, exigindo o ajuste dos traços através do acréscimo de água de amassamento.

A perda de trabalhabilidade observada foi diretamente proporcional ao aumento do teor de cinza e à consequente redução do volume de cimento. Este fenômeno é explicado pela maior presença de finos na mistura, que intensifica a superfície específica total e, por sua vez, aumenta a demanda por água, criando uma resistência interna à circulação da fase aquosa no sistema.

O incremento da relação água/cimento (a/c) nos traços ajustados, imposto pela maior demanda da cinza, teve como resultado direto um aumento da porosidade no material no estado endurecido. Esta elevação da porosidade foi o principal fator para a redução de resistência mecânica e incremento da absorção de água, afetando negativamente a durabilidade.

Apesar da redução na resistência característica à compressão (F_{ck}) em relação ao traço de referência (T0), as misturas contendo cinza (T10, T20 e T40) demonstraram resultados promissores. Especificamente, os traços T10 e T20 atingiram valores de resistência compatíveis com os requisitos de concreto estrutural estabelecidos pela norma técnica brasileira (NBR), atestando sua viabilidade técnica de aplicação a depender da resistência característica solicitada.

Em suma, dependendo dos requisitos de projeto, os concretos desenvolvidos justificam sua utilização como uma alternativa sustentável ao concreto convencional. Essa aplicação contribui

significativamente para a redução do consumo de recursos naturais inerentes à produção do cimento Portland.

REFERÊNCIAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR NM 67:** concreto – determinação da consistência pelo abatimento do tronco de cone. Rio de Janeiro: ABNT, 1998.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR NM 248:** agregados – determinação da composição granulométrica. Rio de Janeiro: ABNT, 2003.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR NM 45:** agregados – determinação da massa unitária e do volume de vazios. Rio de Janeiro: ABNT, 2006.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR NM 52:** agregado miúdo – determinação de massa específica e massa específica aparente. Rio de Janeiro: ABNT, 2009a.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR NM 53:** agregado graúdo – determinação de massa específica, massa específica aparente e absorção de água. Rio de Janeiro: ABNT, 2009b.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 12821:** preparação de concreto em laboratório – procedimento. Rio de Janeiro: ABNT, 2009c.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 9778:** argamassa e concreto endurecidos – determinação da absorção de água, índice de vazios e massa específica. Rio de Janeiro: ABNT, 2009d.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 9775:** agregado miúdo – determinação do teor de umidade superficial por meio do frasco de Chapman –

método de ensaio. Rio de Janeiro: ABNT, 2012.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 8953**: concreto para fins estruturais – classificação pela massa específica, por grupos de resistência e consistência. Rio de Janeiro: ABNT, 2015a.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 12655**: concreto de cimento Portland – preparo, controle, recebimento e aceitação – Procedimento. Rio de Janeiro: ABNT, 2015b.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5738**: concreto – procedimento para moldagem e cura de corpos de prova. Rio de Janeiro: ABNT, 2016.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5739**: concreto – ensaio de compressão de corpos de prova cilíndricos. Rio de Janeiro: ABNT, 2018.

BAUER, L. A. F. **Materiais de construção 1**. 5 ed. revisada. Rio de Janeiro: LTC, 2008.

CUNHA, A. L. X. **Reciclagem dos rejeitos da atividade de mariscagem**: uso na indústria de blocos pré-moldados de concreto. 2020. 184p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Ambiental) – Universidade Federal Rural de Pernambuco, Recife. Disponível em: <http://www.tede2.ufrpe.br:8080/tede2/handle/tede2/9130>. Acesso em 01 out. 2025.

GUIMARÃES, L. B.; MALAGÓN, L. A. G.; SILVA, J.; BARAÚNA, O. S.; MARQUES, J. J. S. Potencial de aproveitamento da energia solar para aquecimento de água nas lavanderias industriais do APL de confecções do agreste de Pernambuco. *In*: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENERGIA SOLAR, 7, 2018, Gramado. **Anais...** Gramado: ABENS, 2018. Disponível em: <https://anaiscbens.emnuvens.com.br/cbens/article/view/457/457>. Acesso em: 27 de set. 2025.

GLUITZ, A. C.; MARAFÃO, D. **Utilização da cinza da madeira de eucalipto na substituição parcial do cimento Portland em argamassa**. 2013. 53p. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Química Industrial) – Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Pato Branco. Disponível em: <https://repositorio.utfpr.edu.br/jspui/handle/1/15272>. Acesso em: 12 out. 2025.

HAGEMANN, S. E. **Apostila de materiais de construção básicos**. 2011. Disponível em: http://tics.ifsul.edu.br/matriz/conteudo/disciplinas/_pdf/apostila_mcb.pdf. Acesso em: 10 out. 2025.

LEHNE, J.; PRESTON, F. Making concrete change: innovation in low-carbon cement and concrete. **Chatham House Report**. 2020. Disponível em: <https://www.chathamhouse.org/2018/06/making-concrete-change-innovation-low-carbon-cement-and-concrete>. Acesso em: 28 set. 2025.

LIMA, R. A. P. **Concretos auto-adensáveis com incorporação de cinza de madeira da algaroba como filer alternativo**. 2019. 80p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil e Ambiental) – Universidade Federal de Pernambuco, Caruaru. Disponível em: <https://repositorio.ufpe.br/handle/123456789/34213>. Acesso em: 02 out. 2025.

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

MEIER, D. **Análise da qualidade do agregado miúdo fornecido em Curitiba e região metropolitana**. 2011. 73p. Trabalho de Conclusão de Curso (Tecnologia em Concreto) – Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curitiba. Disponível em: <https://repositorio.utfpr.edu.br/jspui/handle/1/9323>. Acesso em: 16 out. 2025.

MELO, F. C. A. C. **Análise de argamassas com substituição parcial do cimento Portland por cinza residual de lenha de algaroba**. 2012. 103p. Dissertação (Mestrado

em Engenharia Civil) – Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal. Disponível em: <https://repositorio.ufrn.br/items/9ff91787-e2c2-4844-9d9b-196dcbf7cf89>. Acesso em: 27 set. 2025.

MELO, M. C. S. **Estudo de argamassas adicionadas de cinzas de algaroba geradas no arranjo produtivo local de confecções do agreste pernambucano**. 2012. 121p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil e Ambiental) – Universidade Federal de Pernambuco, Caruaru. Disponível em: <https://repositorio.ufpe.br/handle/123456789/10407>. Acesso em: 03 out. 2025.

NASCIMENTO, J. E. M. F. **Avaliação dos efeitos da substituição da cal hidratada por cinzas de algaroba em argamassas de revestimento**. 2014. 107p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil e Ambiental) – Universidade Federal de Pernambuco, Caruaru. Disponível em: <https://repositorio.ufpe.br/handle/123456789/11306>. Acesso em: 01 out. 2025.

NASCIMENTO, J. E. M. F.; SANTOS, H. M. M.; SOARES NETO, M. F.; SILVA JÚNIOR, J. C. C. Avaliação das propriedades dos concretos nos estados fresco e endurecido após a adição de cinza de madeira. **Revista Científico**, Fortaleza, v. 16, n. 34, jul./dez. 2016. Disponível em: <https://1library.org/document/y83v88rq-avaliacao-propriedades-concretos-estados-fresco-endurecido-adicao-madeira.html>. Acesso em: 27 set. 2025.

NASCIMENTO, J. E. M. F.; NÓBREGA, A. C. V.; FERREIRA, H. C.; NEVES, G. A.; SANTANA, L. N. L. Cinza de biomassa rica em calcário como material carbonático em sistemas cimentícios de base Portland. **Revista Cerâmica**, São Paulo, n. 65, p. 85-91, 2019. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/ce/a/sdsgh8gdPwnsTGvVDnM3rSt/?format=pdf&lang=pt>. Acesso em: 27 set. 2025.

PIRES, D. R. **Desenvolvimento de argamassas com substituição parcial do cimento Portland por cinzas de algaroba**

geradas do APL (Arranjo Produtivo Local) de confecções de Pernambuco. 2016. 97p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil e Ambiental) – Universidade Federal de Pernambuco, Caruaru. Disponível em: <https://repositorio.ufpe.br/handle/123456789/17150>. Acesso em: 28 set. 2025.

RESENDE, D. S. **Estudo do efeito da incorporação de cinzas de cavaco de eucalipto como material cimentício suplementar**. 2013. 168p. Tese (Doutorado em Engenharia de Materiais) – Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto. Disponível em: <http://educapes.capes.gov.br/handle/capes/557456>. Acesso em: 02 out. 2025.

RIBEIRO, V. A. S.; TAVARES, C. R. G. Análise do reuso de efluente de lavanderia de jeans tratado por fotocatalise heterogênea. **Brazilian journal of animal and environmental research**. Curitiba, v. 1, n. 2, p. 395-404, out./dez., 2018. Disponível em: <https://ojs.brazilianjournals.com.br/ojs/index.php/BJAER/article/view/1041>. Acesso em: 29 set. 2025.

RODRIGUES, P. P. F. **Parâmetros de dosagem do concreto**. 2 ed. São Paulo: ABCP, 1995.

SANTOS, N. A. **Incorporação do resíduo de lâ de vidro para produção de placas cimentícias**. 2015. 90p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Metalúrgica e de Materiais) – Instituto Federal do Espírito Santo, Vitória. Disponível em: <https://repositorio.ifes.edu.br/handle/123456789/340>. Acesso em: 29 set. 2025.

SILVA, R. B.; FONTES, C. M. A.; LIMA, P. R. L.; GOMES, O. F. M.; LIMA, L. G. L. M.; MOURA, L. C. A.; TOLEDO FILHO, R. D. Cinzas de biomassa geradas na agroindústria do cacau: caracterização e uso em substituição ao cimento. **Ambiente Construído**, Porto Alegre, v. 15, n. 4, p. 321-334, out./dez., 2015. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/ac/a/9YTz3xwzQDjvkCjn3HRdGp/abstract/?lang=pt>. Acesso em: 01 out. 2025.

SILVA JÚNIOR, F. A.; MARTINELLI, A. E. Análise das propriedades do agregado graúdo: brita de origem calcária, proveniente do rejeito da fabricação de cimentos, para compósitos cimentícios. *In*: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA E CIÊNCIA DOS MATERIAIS, 21, 2014, Cuiabá. **Anais...** Cuiabá: 2014. Disponível em: <http://www.metallum.com.br/21cbecimat/CD/PDF/204-093.pdf>. Acesso em: 20 out. 2025.

SIQUEIRA, L. V. M. Laboratório de materiais de construção – II 1ª Parte – **Agregados**: apostila de ensaios tecnológicos da UDESC – Universidade do Estado de Santa Catarina. Joinville, 2008. Disponível em: <https://pt.slideshare.net/DandaEDF/ensaios-tecnologicos-agregados>. Acesso em: 10 out. 2025.

SINDICATO NACIONAL DA INDÚSTRIA DO CIMENTO. **Relatório anual**. 2023. Disponível em: http://snic.org.br/assets/pdf/relatorio_anual/1732731328.pdf. Acesso em: 04 out. 2025.

VASKE, N. R. **Estudo preliminar da viabilidade do aproveitamento da cinza proveniente de filtro multiciclone pela combustão de lenha de eucalipto em caldeira fumotubular como adição ao concreto**. 2012. 325p. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre. Disponível em: <https://lume.ufrgs.br/handle/10183/75712>. Acesso em: 25 de set. 2025.

AGRADECIMENTOS

Primeiramente, agradeço ao Criador por me permitir vencer mais essa etapa da vida, dando força e proteção nos momentos mais difíceis. Agradeço aos meus pais por todo o investimento em mim; e minha filha por ser o combustível das minhas conquistas.

Agradeço ao Prof. Romildo pela confiança, disponibilidade e, principalmente, amizade. Agradeço à UFRPE (Sede e

UACSA) pela estrutura ofertada para a realização deste trabalho e à coordenação e corpo docente do curso de Engenharia Civil, que foram fundamentais no meu crescimento profissional.

Por fim, agradeço à Lavanderia Nossa Senhora do Carmo pela parceria e fornecimento do material; aos amigos pela torcida, em especial os colegas de curso Ana Isabele, Davi Alencar, Jamilly Oliveira, Luane Isabele e Pedro Victor; e todos que, direta ou indiretamente, participaram dessa trajetória.