



**INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA DO
TOCANTINS
CAMPUS PALMAS
CURSO SUPERIOR DE ENGENHARIA CIVIL**

BEATRIZ LUSTOSA ALMEIDA

**PRODUÇÃO DE CONCRETO COM SUBSTITUIÇÃO PARCIAL DO CIMENTO
POR CINZA VOLANTE DE EUCALIPTO**

PALMAS

2025

BEATRIZ LUSTOSA ALMEIDA

**PRODUÇÃO DE CONCRETO COM SUBSTITUIÇÃO PARCIAL DO CIMENTO
POR CINZA VOLANTE DE EUCALIPTO**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à
Coordenação do curso de bacharelado em
Engenharia Civil da unidade Palmas do Instituto
Federal do Tocantins, como exigência à obtenção
do título de Bacharel em Engenharia Civil.

Orientador: Prof. Evandro Schmitt

**PALMAS
2025**

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)
Bibliotecas do Instituto Federal do Tocantins

A447p Almeida, Beatriz Lustosa
Produção de concreto com substituição parcial do cimento por cinza volante de eucalipto / Beatriz Lustosa Almeida. – Palmas, TO, 2025.
72 p. : il. color.

Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Civil) – Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Tocantins, Campus Palmas, Palmas, TO, 2025.

Orientador: Esp. Evandro Schimitt

1. Cinza Volante. 2. Concreto. 3. Sílica. I. Schimitt, Evandro. II. Título.

CDD 624

A reprodução total ou parcial, de qualquer forma ou por qualquer meio, deste documento é autorizada para fins de estudo e pesquisa, desde que citada a fonte.

Elaborado pelo sistema de geração automática de ficha catalográfica do IFTO com os dados fornecidos pelo(a) autor(a).

BEATRIZ LUSTOSA ALMEIDA

**PRODUÇÃO DE CONCRETO COM SUBSTITUIÇÃO PARCIAL DO CIMENTO
POR CINZA VOLANTE DE EUCALIPTO**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à
Coordenação do curso de bacharelado em
Engenharia Civil da unidade Palmas do Instituto
Federal do Tocantins, como exigência à obtenção
do título de Bacharel em Engenharia Civil.

Aprovado em: ____ / ____ / ____

BANCA AVALIADORA

Documento assinado digitalmente



EVANDRO SCHMITT

Data: 03/02/2026 20:24:21-0300

Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof. Me. Evandro Schmitt

Orientador - IFTO

Documento assinado digitalmente



LILIANE FLÁVIA GUIMARAES DA SILVA

Data: 03/02/2026 17:39:18-0300

Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof. Dra. Liliane Flávia Guimarães da Silva

IFTO

Documento assinado digitalmente



KARLA CRISTINA BENTES MOREIRA

Data: 03/02/2026 20:30:11-0300

Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof. Me. Karla Cristina Bentes Moreira

IFTO

RESUMO

O presente trabalho teve como objetivo avaliar o reaproveitamento da Cinza Volante de Eucalipto (CVE), resíduo proveniente de unidades de secagem de grãos, como material suplementar na produção de concreto, por meio da substituição parcial do cimento Portland nos teores de 0%, 5%, 10% e 15%. A metodologia compreendeu revisão da literatura, caracterização físico-química da CVE e avaliação do desempenho dos concretos produzidos, verificando-se que a cinza não atende aos requisitos da NBR 12653 (ABNT, 2014) para classificação como material pozolânico, tanto sob o critério de finura — em função da predominância de partículas entre 300 μm e 600 μm , com retenção superior a 20% na peneira de 45 μm — quanto em relação à composição química, uma vez que a soma dos óxidos de SiO_2 , Al_2O_3 e Fe_2O_3 totalizou 56,9%, valor inferior ao mínimo normativo de 70%. No estado fresco, observou-se redução progressiva da trabalhabilidade com o aumento do teor de substituição, com valores de abatimento passando de 93 mm no traço de referência (0%) para 52 mm no concreto com 15% de CVE. No estado endurecido, os resultados indicaram decréscimo da resistência à compressão axial em todos os teores avaliados, variando de 21,2 MPa no traço 0% para 13,8 MPa no teor de 15%, enquanto a resistência à tração por compressão diametral apresentou valores de 2,14 MPa para o traço 0%, 2,18 MPa para o teor de 5% e 2,20 MPa para o teor de 15%, evidenciando desempenho superior nos teores com adição de CVE. Quanto aos parâmetros de durabilidade, o ensaio de absorção de água por imersão indicou que o teor de 10% de CVE apresentou o melhor desempenho, com índice de vazios de 8,99% e absorção de água de 4,92%, refletindo maior densificação da matriz cimentícia. Dessa forma, conclui-se que a CVE apresenta potencial de aplicação no concreto, atuando como material de preenchimento (efeito filler), embora seu desempenho seja dependente do teor de substituição e da propriedade analisada, não sendo possível estabelecer um percentual único ótimo.

Palavras-chave: Cinza Volante. Concreto. Sílica. Cimento Portland.

ABSTRACT

This study aimed to evaluate the feasibility of reusing Eucalyptus Fly Ash (EFA), a residue generated in grain drying units, as a supplementary cementitious material in concrete through partial replacement of Portland cement at levels of 0%, 5%, 10%, and 15%. The methodology comprised a literature review, physical and chemical characterization of the EFA, and an assessment of the performance of the produced concretes. The characterization results indicated that the EFA does not meet the requirements of NBR 12653 (ABNT, 2014) for classification as a pozzolanic material, both in terms of fineness—due to the predominance of particles between 300 μm and 600 μm , with retention greater than 20% on the 45 μm sieve—and chemical composition, as the sum of SiO_2 , Al_2O_3 , and Fe_2O_3 reached only 56.9%, below the minimum requirement of 70%. In the fresh state, a progressive reduction in workability was observed with increasing replacement levels, with slump values decreasing from 93 mm for the reference mix (0%) to 52 mm for the mix with 15% EFA. In the hardened state, compressive strength decreased for all replacement levels, ranging from 21.2 MPa for the reference mix to 13.8 MPa for the 15% EFA mix. Conversely, splitting tensile strength showed comparable or slightly improved performance at replacement levels of 5% and 15% compared to the reference concrete. Regarding durability parameters, the water absorption by immersion test indicated that the 10% EFA mixture presented the best performance, with the lowest void index (8.99%) and water absorption (4.92%), indicating greater matrix densification. Overall, the results demonstrate that EFA presents potential for use in concrete predominantly as a filler material; however, its performance depends on the replacement level and the property evaluated, making it impossible to define a single optimal replacement percentage.

Keywords: Fly Ash. Concrete. Silica. Cimento Portland.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1- Organograma da metodologia.....	23
Figura 2 – Cinza no natural	24
Figura 3 – Analise granulométrica da cinza	25
Figura 4 – Análise granulométrica dos agregados.....	26
Figura 5 - Materiais utilizados.....	27
Figura 6 - Cura úmida.....	28
Figura 7 – Slump test.....	29
Figura8 – Compressão	30
Figura 9 - Tração	30
Figura 10 – Massa específica	31
Figura 11 - Cinza coletadas	33

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Composição dos traços	27
Tabela 2 – Cronograma da concretagem e rompimento dos corpos de prova.....	28
Tabela 3 – Óxidos.....	32
Tabela 4 – Cronograma de moldagem e rompimento dos corpos de prova	34

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1 - Resistência à compressão axial	35
Gráfico 2 - Resistência à compressão de trabalhos semelhantes.....	36
Gráfico 3 - Resistência à tração por compressão diametral.....	37
Gráfico 4 - Resistência à tração de trabalhos semelhantes.....	38
Gráfico 5 – Absorção e índice de vazios (%)	39
Gráfico 6 – Massa específica (g/cm ³)	40

LISTA DE SIGLAS

ABCP	Associação Brasileira de Cimento Portland
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ASTM	American Society for Testing and Materials
IBGE	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
CVE	Cinza Volante de Eucalipto
IFTO	Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Tocantins
NBR	Norma Brasileira Regulamentadora
SNIC	Sindicato Nacional da Indústria do Cimento
UFG	Universidade Federal de Goiás

LISTA DE SIMBOLOS

Al	Alumínio
Al ₂ O ₃	Óxido de Alumínio
C-S-H	Silicato de cálcio hidratado
Ca	Cálcio
CaO	Óxido de cálcio
Cl	Cloro
FCK	Resistência característica à compressão do concreto
Fe	Ferro
Fe ₂ O ₃	Óxido de Ferro (III)
K	Potássio
K ₂ O	Óxido de potássio
LOI	Perda por ignição
Mg	Magnésio
MgO	Óxido de magnésio
Mn	Manganês
Na ₂ O	Óxido de Sódio
P	Fósforo
P ₂ O ₅	Pentóxido de Fósforo
S	Enxofre
Si	Silício
SiO ₂	Dióxido de silício
SO ₃	Trióxido de Enxofre
TiO ₂	Dióxido de Titânio
Ti	Titânio

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	12
1.1 Problema de pesquisa	13
1.2 Justificativa	14
1.3 Objetivos.....	15
1.3.1 Objetivo Geral	15
1.3.2 Objetivos Específicos	15
2 REVISÃO DE LITERATURA.....	16
2.1 Concreto com adição de sílica	16
2.1.1 Influência da cinza volante nas propriedades do concreto fresco.....	18
2.1.2 Influência da cinza volante nas propriedades do concreto endurecido.....	18
2.2 Cinzas Volantes	19
2.2.1 Cinza volante de eucalipto	20
2.3 Cimento Portland.....	21
2.4 Agregados.....	21
3 PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS.....	23
3.1. Coleta da cinza	23
3.1.1. Cimento Portland.....	25
3.1.2. Agregados	26
3.2 Produção do concreto.....	26
3.2.1. Moldagem.....	27
3.2.2. Cura Úmida	28
3.3 Ensaios	29
3.3.1. <i>Slump teste</i>	29
3.3.2 Resistência à compressão axial e a tração por compressão diametral.....	29
3.3.3 Absorção de água.....	30
3.4. Análise de dados	31

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	32
4.1 Fluorescência de Raios X	32
4.2 Granulometria da cinza	33
4.3 Slump Test.....	34
4.4 Resistência à compressão axial.....	35
4.5 Resistência à tração por compressão diametral.....	36
4.6 Absorção de água.....	38
5. CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	41
REFERÊNCIAS	43
APÊNDICE A - Resistência à compressão	47
APÊNDICE B - Resistência à tração	56
ANEXO A - Fluorescência de raios.....	65

1 INTRODUÇÃO

O cimento Portland é um material aglomerante de natureza hidráulica, produzido a partir da moagem do clínquer, ao qual se adiciona sulfato de cálcio durante o processo, conforme definido pela NBR 16697 (ABNT, 2018). A relevância desse material é evidenciada pelo seu consumo no país que, no último ano, apresentou um crescimento expressivo. Segundo dados do SNIC (2024), o setor encerrou o ano de 2024 com um total de 64,7 milhões de toneladas de cimento vendidas, representando um aumento de 3,9% (2,4 milhões de toneladas) em relação ao ano anterior.

Diante desse cenário, intensifica-se o interesse por materiais capazes de substituir parcialmente o clínquer, entre os quais se destacam as adições minerais. Tais materiais auxiliam na redução da relação clínquer/cimento (Dey et al, 2022) e, simultaneamente, constituem uma alternativa estratégica para aprimorar determinadas propriedades do concreto.

Conforme Isaia (2010), essas adições são empregadas para melhorar a trabalhabilidade no estado fresco e a durabilidade em condições de serviço, devido à sua interação química e física com os produtos da hidratação do cimento. Especificamente, o uso de cinzas volantes contribui para reduzir a exsudação e, no concreto endurecido, pode resultar em resistência e menor permeabilidade (Fonseca, 2010), desde que apresentem composição química adequada e distribuição granulométrica uniforme, enquadrando-se como materiais pozolânicos (Resende, 2013).

Entre as diferentes cinzas volantes, a cinza de eucalipto destaca-se por ser um resíduo agroindustrial abundante no país. Sua composição química, rica em sílica e alumina, indica um potencial pozolânico para aplicação na construção civil. Conforme os resultados obtidos por Santos (2016), a composição química é composta por sílica (SiO_2), alumina (Al_2O_3), óxidos de ferro (Fe_2O_3), óxidos de cálcio (CaO), óxidos de magnésio (MgO) e óxidos de potássio (K_2O).

Nesse contexto, a utilização da CVE como substituição parcial do cimento Portland apresenta-se como uma alternativa interessante para a produção de concretos. Assim, o presente estudo analisou o comportamento do concreto com diferentes teores de substituição do cimento por essa cinza, buscando verificar sua influência nas propriedades do material e determinar um teor adequado para sua aplicação.

1.1 Problema de pesquisa

A busca por melhorias no desempenho, resistência e durabilidade do concreto na construção civil tem levado à exploração de materiais cimentícios com a finalidade de agregar características ao cimento Portland, provenientes de resíduos com teor de sílica em sua composição. Tal interesse se justifica pela relevância do concreto em função de sua versatilidade, facilidade de moldagem e adaptabilidade a diferentes tipos de estruturas.

Embora a cinza volante apresente um potencial promissor, o seu uso como substituto parcial do cimento enfrenta desafios significativos como a variabilidade na composição e a influência sobre as propriedades do concreto. Dessa forma, este estudo visa determinar: qual fonte de sílica natural é eficaz como adição ao concreto, com base em seu teor de substituição parcial ao cimento?

1.2 Justificativa

O concreto é utilizado como material de construção na sociedade moderna devido ao crescimento da urbanização e industrialização (Aprianti et al, 2015). Nesse contexto, a busca por materiais cimentícios suplementares que otimizem o desempenho e a sustentabilidade do concreto é constante.

A cinza volante é o material pozolânico mais utilizado na produção de cimentos (Isaia, 2010). No que tange a materiais alternativos, Borlini et al (2005) afirma que a composição química da cinza de eucalipto é caracterizada, principalmente, pela presença de quantidades significativas de CaO e SiO_2 , além de conter concentrações de K_2O e MgO , elementos que contribuem para o potencial reativo do material como adição mineral no concreto.

Pesquisas como a de Casagrande (2019) demonstram o potencial da utilização de cinza volante como substituição parcial do cimento. O autor notou uma melhora nas propriedades mecânicas e na durabilidade das amostras com a utilização da cinza volante como substituição do concreto. Além disso, a resistência à compressão foi elevada em todos os teores de substituições em comparação com a referência. Observou-se a diminuição dos índices de volume permeável em função da substituição da cinza no concreto.

Diante do exposto, justifica-se a realização deste trabalho, que busca avaliar o comportamento do concreto frente à substituição parcial do cimento Portland por CVE. A investigação mostra-se relevante por permitir compreender o potencial da cinza como material cimentício suplementar e verificar sua influência nas propriedades mecânicas e físicas do concreto.

1.3 Objetivos

1.3.1 Objetivo Geral

Avaliar o desempenho físico e mecânico da incorporação da cinza volante derivada do rejeito de queimas de eucalipto como substituto parcial do cimento Portland em concreto, visando o desenvolvimento de um material alternativo para otimizar as aplicações na engenharia civil.

1.3.2 Objetivos Específicos

- Caracterizar as propriedades físico-químicas da CVE, estabelecendo correlações entre sua microestrutura e seu potencial como material cimentício suplementar;
- Avaliar o comportamento mecânico e físico de concretos com diferentes taxas de substituição (0%, 5%, 10% e 15%) de cimento por cinza volante, através de ensaios de resistência à compressão axial, tração por compressão diametral, slump test e absorção por imersão;
- Aplicação da análise de resultados para estabelecer correlações quantitativas entre a composição da CVE e as propriedades mecânicas resultantes do concreto.

2 REVISÃO DE LITERATURA

2.1 Concreto com adição de sílica

A NBR 13956-1 (ABNT, 2012) define sílica ativa como material decorrente do processo de produção de sílico metálico ou ligas de ferro sílico em fornos elétricos. Constitui-se um tipo de pozzolana formada por partículas esféricas de sílica em seu estado amorfo. A sílica é o componente ativo que confere a pozzolanicidade. Neville e Brooks (2010) explicam que as partículas de sílica ativa tendem a ocupar os espaços entre os grãos de cimento, reduzindo a presença de vazios na matriz. Além disso, esse material reage com o hidróxido de cálcio gerado na hidratação, promovendo a formação adicional de C-S-H, o que resulta em uma pasta cimentícia mais densa e menos porosa.

O material pozzolânico é empregado como aditivo na fabricação do cimento com o objetivo de aprimorar a qualidade dos produtos cimentícios destinados à construção civil. Nesse contexto, a sílica ativa, devido à sua elevada reatividade, pode ser utilizada como substituição parcial do cimento, inclusive em concretos de média e baixa resistência, contribuindo para a redução da exsudação e para o aumento da coesão da mistura (Neville, 2015). Em consonância, Resende (2013) destaca que as propriedades da superfície, a distribuição granulométrica das partículas e a morfologia da cinza volante empregada como adição mineral ao concreto têm impacto no consumo de água, na trabalhabilidade do concreto fresco e na velocidade de desenvolvimento da resistência no concreto endurecido.

No setor da construção civil, existe um amplo potencial para o desenvolvimento de novos materiais por meio da incorporação de resíduos na produção de componentes construtivos. Essa prática pode modificar determinadas propriedades mecânicas, como ocorre com a adição de cinzas provenientes da queima de madeira em alto-forno (Figueiredo Neto et al, 2020 et al, 2020). Neste sentido, Rasekh et al., (2020) confirmam que as características da incorporação de cinzas volantes no concreto é uma alternativa econômica, melhora sua trabalhabilidade e oferece uma solução para descarte de resíduos.

Casagrande (2019) descreve que, em diferentes períodos de hidratação, ocorre a redução do volume de vazios à medida que aumenta a quantidade de cinza incorporada em substituição ao cimento Portland. Após a cura do material, observa-se uma menor evolução macroestrutural, indicando que a incorporação da cinza pode contribuir para o incremento da densidade da matriz

cimentícia. No entanto, esse efeito tende a apresentar menor eficiência à medida que se eleva o teor de substituição. Segundo Herath et al (2020), as cinzas volantes têm sido utilizadas como material de substituição parcial do cimento, sendo usualmente limitadas a teores de até 30%.

2.1.1 Influência da cinza nas propriedades do concreto fresco

As características do concreto no estado fresco são essenciais, uma vez que a verificação de sua trabalhabilidade impacta diretamente fatores como o custo e a qualidade do produto final (Mehta; Monteiro, 2014). De acordo com Oliveira (2018), o concreto recém misturado, ainda no seu estado plástico, já apresenta algumas de suas propriedades, sendo que as principais características do concreto no estado fresco são trabalhabilidade e a consistência. A consistência do concreto fresco está associada à facilidade de escoamento e à coesão da mistura, enquanto a trabalhabilidade diz respeito à capacidade do concreto de se adaptar adequadamente a todas as etapas do processo, como mistura, transporte, lançamento e acabamento.

A consistência pode ser entendida como um aspecto específico dentro do conceito mais amplo de trabalhabilidade, estando diretamente vinculada às condições de aplicação do concreto. As principais técnicas utilizadas para caracterizar o concreto no estado fresco analisam seu comportamento de fluxo sob diferentes situações, permitindo concluir que essas avaliações estão, na verdade, mensurando a consistência do material. (Romano et al, 2011).

Segundo Mehta e Monteiro (1994), a trabalhabilidade do concreto consiste na combinação de pelo menos duas características: a fluidez e a coesão. A fluidez refere-se à facilidade com que o concreto se desloca, enquanto a coesão está relacionada à resistência à exsudação ou à segregação do material. Nesse contexto, Andolfato (2002) destaca que a consistência do concreto é geralmente medida no ensaio de abatimento (slump test).

A incorporação de cinza volante ao compósito promove reações pozolânicas com os produtos da hidratação do cimento, resultando na formação gradual de uma microestrutura mais densa e refinada ao longo do tempo (Zucareli et al, 2021). Além disso, a utilização da cinza volante como substituto parcial do cimento tende a minimizar a exsudação, facilitar o bombeamento, retardar o início de pega e aumentar a trabalhabilidade do concreto fresco, efeitos associados tanto à sua atividade pozolânica quanto ao empacotamento proporcionado por suas partículas finas, que reduzem os índices de vazios e diminuem a demanda de água para conferir plasticidade ao sistema (Fonseca, 2010).

A diminuição da demanda de água observada com a incorporação de cinzas volantes, pode ser explicada por diversos fatores, conforme detalhado por Siddique et al (2021). Entre eles, destacam-se: a menor densidade da cinza volante em relação ao cimento, o que aumenta o volume da pasta para a mesma massa de substituição; o efeito de rolamento de esferas das partículas esféricas, que reduz o atrito entre as partículas na massa de concreto; a redução da floculação das partículas de cimento devido à diluição do teor de cimento; e o retardo da hidratação do cimento em idade precoce. É fundamental ressaltar que, embora o teor de água exerça influência direta sobre a fluidez do concreto, uma vez que seu aumento tende a elevar a trabalhabilidade da mistura, o excesso de água pode provocar exsudação e segregação, comprometendo o desempenho final do material (Mehta; Monteiro, 2008).

2.1.2 Influência da cinza volante nas propriedades do concreto endurecido

O estudo de Oliveira (2018) apresenta as propriedades do concreto no estado endurecido, dentre elas: resistência à compressão, resistência à tração, absorção de água, dentre outras. Mehta e Monteiro (2008) define a resistência é como uma medida da tensão necessária para provocar a ruptura de um material. A teoria da tensão utilizada no dimensionamento do concreto o considera especialmente eficiente para suportar esforços de compressão; por essa razão, a resistência à compressão é a propriedade mais comumente especificada.

A resistência à compressão é considerada a principal propriedade do concreto, pois está diretamente relacionada ao seu comportamento estrutural (Oliveira, 2018). Santos et al (2013) destacam que essa característica é amplamente utilizada devido à confiabilidade e à simplicidade de sua determinação, realizada por meio do ensaio de compressão em corpos de prova cilíndricos, conforme especificado na NBR 5739 (ABNT, 2018).

A resistência à tração é uma propriedade secundária do concreto, uma vez que o material apresenta baixo desempenho frente a esforços tracionados (Oliveira, 2018). Contudo, Bessa (2011) ressalta que a resistência à tração constitui uma propriedade relevante do concreto, pois possibilita estimar o carregamento a partir do qual se inicia o processo de fissuração em uma estrutura. Andolfato (2002) afirma que o concreto endurecido possui alta resistência a compressão, mas baixa resistência a tração. Segundo Mehta e Monteiro (1994), no ensaio de tração, ocorre a ruptura do corpo de prova de concreto, que é então considerado fraturado. Já no ensaio de compressão, o corpo de prova é considerado rompido mesmo na ausência de

fraturas externas visíveis, sendo suficiente a presença de fissuras internas avançadas, caracterizando a incapacidade do material de suportar cargas adicionais.

A incorporação de cinza volante tende a reduzir a resistência mecânica nos primeiros dias de cura. Contudo, com o avanço da cura, esses concretos podem atingir ou até superar os níveis de resistência obtidos com cimento Portland convencional (Fonseca, 2010). Resende (2013) corrobora essa viabilidade, afirmando que a cinza de cavaco de eucalipto se mostra uma alternativa promissora em termos de desempenho mecânico, tanto para resistência à compressão quanto à tração. A contribuição da cinza para a resistência à compressão ocorre de diferentes maneiras, sendo a finura das cinzas volantes um fator de grande efeito (Chindaprasirt et al, 2007). Além disso, a cinza volante aprova a resistência à compressão por meio da reação pozolânica das fases vítreas de sílica e alumina com hidróxido de cálcio, o que resulta na formação de silicato de cálcio hidratado adicional (Siddique et al, 2021).

O efeito da reação pozolânica é a diminuição do volume dos grandes poros capilares no concreto, pois o material mais fino se dissolve e reage mais rapidamente na fase líquida do sistema de hidratação (Siddique et al, 2021). Quando submetidos a uma cura úmida adequada, os concretos com adição de cinzas demonstram menor permeabilidade, o que resulta em uma proteção mais eficiente das armaduras contra agentes agressivos (Fonseca, 2010). O estudo laboratorial de Casagrande (2019) ilustra esse benefício, destacando que o teor de 10% de cinza incorporado ao concreto apresentou a maior resistência à compressão. Esse comportamento foi atribuído à quantidade de hidróxido de cálcio presente na solução dos poros da pasta cimentícia, a qual possui potencial para a ocorrência de reações pozolânicas, contribuindo para o desenvolvimento dessas reações e resultando em melhor desempenho mecânico do concreto aos 28 dias.

2.2 Cinzas Volantes

A NBR 12653 (ABNT, 2015) define cinzas volantes com resíduos resultado da combustão de carvão mineral pulverizado ou granulado, com a presença de atividade pozolânica. A norma ASTM C 618 (2005) descreve a cinza volante como um resíduo finamente dividido, resultante da combustão do carvão moído ou em pó, que é transportado pelos gases de combustão. Essa norma classifica o material em duas categorias, conforme sua composição química: classe C e classe F. A cinza volante é enquadrada na classe C quando a soma dos

teores de sílica, óxido de ferro, alumina e cálcio é superior a 50%; já quando essa soma ultrapassa 70%, o material é considerado pertencente à classe F.

O processo de formação da cinza volante ocorre durante a queima do carvão em fornalhas. Nas zonas de alta temperatura, as impurezas minerais se fundem, enquanto os materiais voláteis e o carbono são queimados. Ao saírem da zona de combustão, as partículas fundidas de cinza são rapidamente resfriadas, solidificando-se em formas esféricas e vítreas. Uma parte desse material fundido se acumula no fundo, originando a cinza pesada, enquanto a maior parcela é levada pelos gases de exaustão, sendo denominada cinza volante. (Fonseca, 2010).

A caracterização da cinza, segundo Borlini et al (2005), é realizada por meio de ensaios de composição química via espectrometria de fluorescência de raios X, identificação das fases das cinzas por difração de raios X (DRX), distribuição de tamanho de partícula por peneiramento e sedimentação de acordo com a norma ABNT, a caracterização microestrutural da cinza é por microscopia eletrônica de varredura (MEV) e a análise térmica por termogravimétrica (TG). Em sua composição, cinza volante apresenta a sílica como principal constituinte, além de conter pequenas proporções de carbono (Recena, 2011). A elevada temperatura do processo de queima é responsável por conferir às cinzas as propriedades pozolânicas (Fonseca, 2010).

Em virtude de suas características mineralógicas e granulométricas, a cinza volante pode ser empregada como material de adição mineral, sem a necessidade de tratamentos prévios. A influência da cinza no concreto está ligada à sua finura: a cinza volante fina apresenta alta reatividade, contribuindo para o ganho de resistência ao favorecer o preenchimento de microvazios. Por outro lado, a utilização de cinza volante grossa pode resultar em maior expansão, devido à elevada relação água/cimento da argamassa (Chindaprasirt, 2004).

2.2.2 Cinza volante de eucalipto

A cinza de eucalipto é classificada como um resíduo sólido mineral resultante da queima da biomassa. A composição da cinza apresenta propriedades pozolânicas, o que permite sua utilização na produção de cimento, visando melhorar a qualidade dos produtos cimentícios na construção civil. Além dessas propriedades, a uniformidade granulométrica dos resíduos também é considerada vantajosa (Foelkel, 2011).

As propriedades físicas da cinza de eucalipto são favoráveis à sua utilização como adição mineral. Suas partículas, possuem uma ampla distribuição de tamanhos e apresentam formas cúbicas e prismáticas. Tais características contribuem para o aumento da densidade de empacotamento dos sistemas nos quais a cinza é incorporada, promovendo o efeito filer. (França et al, 2016).

Quanto à caracterização, os resultados obtidos por Resende (2013) por meio da espectrometria de raios-X dispersivo em energia (EDS) para determinar a composição química da cinza de eucalipto semi-quantitativa detectaram a presença dos compostos: Mg, Al, Si, P, S, Cl, K, Ca, Ti, Mn e Fe.

2.3 Cimento Portland

A NBR 16697 (ABNT, 2018) define cimento Portland como ligante hidráulico que é produzido pela moagem de clínquer Portland, adicionado durante a fabricação, uma quantidade necessária de uma ou mais formas de sulfato de cálcio e adições minerais. Seguindo essa linha de raciocínio, Loh et al (2016) descreve o cimento Portland como o ligante mais importante do concreto, sendo o principal componente que determina as propriedades gerais das infraestruturas de concreto.

O cimento Portland é constituído por uma mistura heterogênea de diversos compostos, cujo processo de hidratação consiste em reações simultâneas entre os compostos anidros e a água. O enrijecimento correspondente à perda de consistência e a pega referente à solidificação da pasta cimentícia são fenômenos determinados pelas reações de hidratação dos aluminatos (Mehta; Monteiro 1994).

Nesse contexto, o cimento possui adições minerais. As adições referem-se a diferentes matérias primas, que quando incorporadas a moagem do clínquer possibilitam uma variedade de tipos de cimento Portland, as quais mudam as suas propriedades e facilitam seu emprego. Estas matérias primas compreendem gesso, escórias de alto forno, materiais pozzolânicos e carbonáticos (ABCP, 2002). De acordo com a norma ASTM C 150 (2009), os cimentos são classificados em cinco tipos principais: Tipo I - uso geral, Tipo II - resistência moderada a sulfatos e calor moderado de hidratação, Tipo III - alta resistência inicial, Tipo IV - baixo calor de hidratação e Tipo V - alta resistência aos sulfatos.

2.4 Agregados

Conforme especificado na NBR 7211 (ABNT, 2022), agregados miúdos são grãos que passam pela peneira com abertura de malha de 4,75 mm e ficam retidos na peneira com abertura de malha de 150 μ m, enquanto os agregados graúdos são grãos que passam pela peneira com abertura de malha de 75 mm e ficam retidos na peneira com abertura de malha de 4,75 mm.

Conforme Alves (1982), a geometria das partículas tem importância relevante nas propriedades das misturas de concreto e argamassa, permitindo uma composição mais trabalhável e compacta. Nesse viés, Mehta e Monteiro (2008) destacam que a granulometria das partículas do agregado graúdo influencia na quantidade de água necessária para atingir determinada consistência. Além disso, areias muito finas ou angulosas demandam maior volume de água para atingir trabalhabilidade, por essa razão é recomendado a utilização de areia grossa.

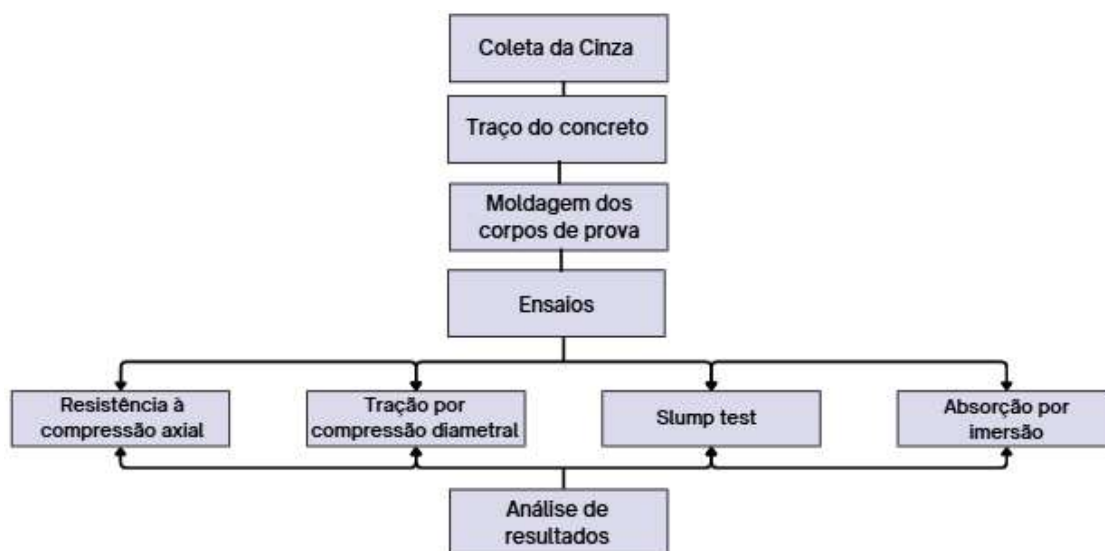
Os agregados constituem componentes do processo de dosagem do concreto, representando cerca de 70% a 80% do seu volume total. Essa elevada participação volumétrica contribui para a redução do custo por unidade de volume, uma vez que apresentam menor valor comercial quando comparados ao cimento. Além disso, sua presença influencia diretamente diversas propriedades do concreto, como a diminuição da retração da pasta cimentícia, o aumento da resistência ao desgaste e a melhoria da trabalhabilidade da mistura (Neves, 2009).

A utilização de agregados baseia-se no fato de que quanto maior sua proporção na mistura, menor tende a ser a relação água/cimento efetiva. Teores elevados também podem reduzir a retração, a exsudação e as variações térmicas geradas pelo calor de hidratação, favorecendo a aderência entre a pasta e os grãos. É válido destacar que a contribuição dos agregados para a resistência do concreto depende não só de sua resistência mecânica, mas também de sua absorção e da qualidade da aderência com a pasta cimentícia (Neville, 2015).

3 PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS

A pesquisa foi desenvolvida no Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Tocantins (IFTO) - Campus Palmas, e consiste em um estudo experimental de laboratório sobre a produção de concreto com substituição parcial do cimento Portland por CVE. A cinza foi incorporada ao traço de trabalho do concreto em diferentes teores de substituição: 0% (referência), 5%, 10% e 15%, com base na massa de cimento. A figura 1 apresenta o organograma da metodologia que será utilizada na execução do estudo.

Figura 1- Organograma da metodologia



Fonte: Autora (2025)

3.1. Coleta da cinza

A amostra da cinza foi coletada no Armazém Portal do Jalapão localizado no município de Novo Acordo – Tocantins, a aproximadamente 115 km de Palmas. O processo de queima da lenha ocorre na máquina denominada cavaqueira, mais precisamente na grelha de combustão situada dentro da câmara de combustão, componente responsável pelo suporte da lenha durante sua queima.

A coleta da amostra foi realizada diretamente na grelha de combustão, cuja temperatura mede em torno 600 °C, conforme a leitura obtida por meio de sensores elétricos da máquina que monitoram a temperatura da fornalha, com a finalidade de manter o processo de queima retilíneo. De acordo com as especificações de Fonseca (2010), as cinzas obtidas através de

processos de combustão controlada, com temperaturas entre 500°C e 700°C, apresentam características amorfas e alta pozzolanicidade, resultando em efeitos benéficos nas propriedades do concreto.

Em seguida, as partículas coletadas foram acondicionadas em caixas acrílicas, material inerte, e posteriormente transportadas ao laboratório do IFTO, garantindo sua adequada conservação para análises subsequentes. A figura 2 mostra as condições da cinza após a coleta.

Figura 2 – Cinza no natural



Fonte: Autora (2025)

A verificação da conformidade granulométrica da cinza foi realizada por peneiramento mecânico, conforme os critérios da NBR 7181 (ABNT, 2025). O ensaio utilizou peneiras padronizadas de série normal e o agitador mecânico. O peneiramento foi adotado em razão da presença de partículas com morfologias irregulares, a fim de assegurar maior uniformidade granulométrica e garantir a qualidade da amostra destinada às análises laboratoriais.

Na figura 3, observam-se três recipientes que representam as diferentes etapas do procedimento: o primeiro (à esquerda) contém a cinza em seu estado bruto; o segundo (ao centro) apresenta a amostra posicionada sobre o conjunto de peneiras metálicas; e o terceiro (à direita) exibe a cinza após o peneiramento, apresentando-se mais homogênea e com granulometria adequada para as etapas experimentais.

Figura 3 – Análise granulométrica da cinza



Fonte: Autora (2025)

Para a caracterização da cinza (apresentada no Anexo A), uma amostra de 150 g foi encaminhada ao laboratório da Universidade Federal de Goiás (UFG), atendendo aos critérios de transporte, acondicionamento e controle de qualidade estabelecidos pela instituição. No laboratório, realizou-se o ensaio de Fluorescência de Raios X (FRX), técnica empregada para identificar e quantificar os constituintes químicos da CVE. A análise foi conduzida em um espectrômetro WDS Bruker S8 Tiger, equipado com tubo de ródio (Rh).

3.1.1. Cimento Portland

O cimento utilizado no traço corresponde ao Cimento Portland com adição de escória granulada de alto-forno, tipo CP II-E, classe 32. A escolha desse aglomerante teve como propósito manter a padronização dos ensaios, uma vez que apresenta em sua composição materiais de natureza pozolânica, conforme o estabelecido pela NBR 16697 (ABNT, 2018).

De acordo com Cimento.ORG (2010), sua composição é constituída de 56% a 94% de clínquer e gesso, e de 6% a 34% de escória granulada de alto-forno. O CP II-E combina baixo calor de hidratação com melhores resultados de resistência mecânica, sendo amplamente utilizado em aplicações que demandam durabilidade e desempenho satisfatório.

3.1.2. Agregados

Os agregados utilizados na composição do concreto são oriundos de uma jazida localizada na região de Palmas – TO. O agregado miúdo adotado é a areia natural de granulometria média, com partículas compreendida entre 0,20 mm e 1,20 mm. Já o agregado graúdo selecionado é a brita 1, com a granulometria que varia entre 9,5 e 25 mm. A classificação granulométrica dos agregados foi realizada conforme os critérios da NBR 7211 (ABNT, 2022).

A verificação da conformidade granulométrica dos agregados, foi realizada através do ensaio de análise granulométrica por peneiramento, seguindo os parâmetros estabelecidos pela NBR 7181 (ABNT, 2025). No ensaio, foram utilizadas peneiras padronizadas de série normal e um agitador mecânico, conforme a figura 4.

Figura 4 – Análise granulométrica dos agregados



Fonte: Autora (2025)

3.2 Produção do concreto

A produção do concreto foi realizada com o auxílio de betoneira com capacidade de 140 litros. O traço de trabalho da produção do concreto foi estabelecido na proporção de massa de 1:2:3 (cimento:areia:brita), com relação água/cimento de 0,53 e sem utilização de aditivos. O traço especificado por Sampaio et al (2014), configura-se como usual no setor da construção civil, garantindo resultado satisfatório, com resistência e durabilidade a longo prazo. A figura 5 apresenta os materiais empregados na composição do traço de referência.

Figura 5 - Materiais utilizados



Fonte: Autora (2025)

O processo de mistura do traço de referência, conforme recomendado por Helene e Terzian (1992), consiste em adicionar os materiais de forma individual na betoneira, obedecendo à seguinte ordem: 80% da água, 100% do agregado graúdo, 100% do agregado miúdo, 100% do cimento e, por fim, os 20% restantes da água. Após todos os materiais serem colocados na betoneira, esta permaneceu em movimento por 5 minutos. Posteriormente, as cinzas foram incorporadas ao traço de trabalho como material de substituição parcial cimentício, conforme as quantidades apresentadas na tabela 1.

Tabela 1 – Composição dos traços

Traço (%)	Cimento (KG)	Cinza volante (KG)	Brita 1 (kg)	Areia média (Kg)	Água (L)
0	5	0	15	10	2,65
5	4,75	0,25	15	10	2,65
10	4,5	0,5	15	10	2,65
15	4,25	0,75	15	10	2,65

Fonte: Autora (2025)

3.2.1. Moldagem

A moldagem dos corpos de prova foi conduzida em moldes com dimensões de 10 cm de diâmetro por 20 cm de altura. O concreto foi lançado em camadas, assegurando-se a

distribuição simétrica do material e o nivelamento superficial. O método de adensamento seguiu os parâmetros conforme especificado pela NBR 5738 (ABNT, 2016).

A tabela 2 apresenta o cronograma utilizado na confecção dos corpos de prova para cada um dos quatro teores de substituição de cimento por CVE. Para cada condição, foram moldados seis corpos de prova, submetidos aos ensaios de resistência à compressão axial (RC), resistência à tração por compressão diametral (RT) e absorção de água (ABS).

Tabela 2 – Cronograma da concretagem e rompimento dos corpos de prova

Traço	Data da concretagem	Rompimento – 7 dias	Rompimento – 28 dias	Ensaio realizado
0	29/09/2025	06/10/2025	27/10/2025	RC, RT, ABS
5%	13/10/2025	20/10/2025	10/11/2025	RC, RT, ABS
10%	13/10/2025	20/10/2025	10/11/2025	RC, RT, ABS
15%	20/10/2025	27/10/2025	17/11/2025	RC, RT, ABS

Fonte: Autora (2025)

3.2.2. Cura Úmida

Concluída a moldagem, os corpos de prova foram armazenados e identificados na sala úmida, conforme demonstrado a figura 6 e de acordo com a NBR 5738 (ABNT, 2016). Decorridas 24 horas, os corpos de prova foram desenformados e, em seguida, submersos em um tanque com água. O tempo de cura determinado foi de 7 e 28 dias, avaliando o desenvolvimento das propriedades do concreto. Após a cura, os corpos de prova foram retificados para garantir que as superfícies estejam planas, para obtenção de precisão nos ensaios mecânicos.

Figura 6 - Cura úmida



Fonte: Autora (2025)

3.3 Ensaios

Os ensaios abrangem a caracterização do concreto no estado fresco e no estado endurecido. No estado fresco, foram verificadas propriedades relacionadas à trabalhabilidade. Já no estado endurecido, foram conduzidos ensaios de desempenho mecânico. As análises foram efetuadas nas idades de cura de 7 e 28 dias.

3.3.1. *Slump teste*

A trabalhabilidade do concreto no estado fresco foi determinada conforme a NBR 16889 (ABNT, 2020), após o término do processo de mistura na betoneira, por meio do ensaio de abatimento do cono de Abrams (Slump test) ilustrado na figura 7, utilizado para avaliar a consistência da mistura e atuar como uma variável de controle.

Figura 7 – Slump test



Fonte: Autora (2025)

3.3.2 Resistência à compressão axial e a tração por compressão diametral

A resistência à compressão dos concretos foi realizada conforme a NBR 5739 (ABNT, 2018), utilizando-se uma prensa hidráulica normatizada, modelo Universal EMIC, com capacidade de 2000 KN. Já a resistência à tração por compressão diametral seguiu os

parâmetros estabelecidos pela normativa NBR 7222 (ABNT, 2011), utilizando o mesmo equipamento. Ambas as resistências foram consideradas como propriedades da variável de resposta, com o objetivo de avaliar o desempenho mecânico do concreto, ilustrando os respectivos ensaios nas figuras 8 e 9.

Figura 8 – Compressão



Fonte: Autora (2025)

Figura 9 - Tração



Fonte: Autora (2025)

3.3.3 Absorção de água

O ensaio de absorção de água por imersão foi realizado conforme os procedimentos estabelecidos pela NBR 9778 (ABNT, 2009). Para sua execução, utilizou-se um corpo de prova de cada traço. Inicialmente, as amostras foram submetidas à secagem em estufa por 72 h para determinação da massa seca. Em seguida, permaneceram imersas em água pelo mesmo período ilustrada na figura 10, permitindo avaliar o aumento de massa em função da área da seção transversal em contato com a água.

Figura 10 – Massa específica



Fonte: Autora (2025)

3.4. Análise de dados

A análise dos dados foi conduzida de forma descritiva e comparativa. O tratamento dos resultados foi realizado através dos parâmetros obtidos em cada traço, utilizando como referencial o desempenho do traço de trabalho (0%), os requisitos normativos e os dados apresentados na literatura. A verificação dos resultados foi realizada por meio de softwares de planilhas (excel), permitindo a análise das variáveis e suas influências nas propriedades físicas e mecânicas do concreto.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1 Fluorescência de Raios X

A caracterização realizada por fluorescência de raios X, ilustrada na tabela 3 e em Anexos, apresenta a composição química da CVE. A sílica (SiO_2) destaca-se como o principal constituinte, representando 53,19% de massa, em seguida o cálcio (CaO), com 17,12%, e a perda por ignição (LOI), que alcança 14,63%.

Tabela 3 – Óxidos

Componente	Unidade	Resultado
SiO_2	%	53,19
TiO_2	%	0,19
Al_2O_3	%	1,44
Fe_2O_3	%	2,26
MnO	%	0,8
MgO	%	4,7
CaO	%	17,12
Na_2O	%	1,1
K_2O	%	2,04
P_2O_5	%	3,51
SO_3	%	< limite de quantificação
LOI	%	14,63
Soma (%)	—	100,98

Fonte: Autora (2025)

De acordo com a NBR 12653 (ABNT, 2014), o material é classificado como pozolânico quando a soma dos teores de SiO_2 , Al_2O_3 e Fe_2O_3 representa no mínimo 70% da sua composição química. No entanto, a CVE apresentou apenas 56,9%, valor inferior ao limite estabelecido. Dessa forma, o material não atende aos requisitos normativos, portanto, não pode ser enquadrado como pozolânico.

O SO_3 é considerado um contaminante e deve apresentar valores máximos de 4% e 5% para pozolanas, conforme a NBR 12653 (ABNT, 2014). No presente estudo, a CVE apresentou concentração inferior ao limite de quantificação, atendendo às exigências normativas. A norma também estabelece que o teor de álcalis disponíveis, expresso como Na_2O , deve ser inferior a 1,7%. A amostra analisada apresentou 1,1%, valor que se encontra em conformidade com o parâmetro especificado.

Nos estudos de Peterson et al (2016), a análise por fluorescência de raios X evidenciou que a cinza de eucalipto apresentou teor elevado de CaO (40%) e quantidades reduzidas de SiO₂ (8,87%), além de K₂O (9,75%) e MgO (6,15%). Resultados próximos foram observados por Borlini (2005), que identificou teores de CaO, SiO₂ e MgO iguais a 32,6%, 16,9% e 7,2%, respectivamente.

4.2 Granulometria da cinza

De acordo com a NBR 12653 (ABNT, 2014), a finura é um dos parâmetros fundamentais para a classificação de materiais pozolânicos, sendo estabelecido que o percentual de material retido na peneira de 45 µm não deve exceder 20%. A CVE analisada, ilustrada na figura 11, apresentou distribuição granulométrica no intervalo entre 300 µm e 600 µm, indicando predominância de partículas de maior dimensão. Tal característica implica em retenção superior ao limite normativo na peneira de 45 µm, evidenciando insuficiente finura do material. Dessa forma, a CVE não atende ao requisito de finura estabelecido pela NBR 12653 (ABNT, 2014), não podendo ser classificada como material pozolânico.

Figura 11 - Cinza coletadas



Fonte: Autora (2025)

De acordo com França et al (2016), a caracterização morfológica e granulométrica das partículas de cinza de eucalipto evidenciou uma distribuição de tamanhos associada a formas cúbicas e prismáticas. Essa combinação favorece a acomodação das partículas na matriz

cimentícia, promovendo o aumento da densidade de empacotamento e a redução da porosidade. Como consequência, ocorre o preenchimento dos vazios existentes entre os grãos de cimento e os agregados, intensificando o efeito filer. Esse mecanismo contribui para a densificação da microestrutura do concreto, influenciando propriedades como a redução da permeabilidade e a diminuição da trabalhabilidade.

4.3 Slump Test

Nos resultados apresentados na tabela 4, observa-se uma redução progressiva da consistência à medida que o teor de substituição aumenta. O traço de referência (0%) obteve um abatimento de 93 mm, valor que decresceu para 52 mm no traço com 15% de cinza. Este fenômeno está ligado às características da cinza como aponta Fonseca (2010), a utilização da cinza volante como substituto parcial do cimento promove o empacotamento proporcionado por suas partículas, os quais contribuem para a redução dos índices de vazios, afetando a trabalhabilidade.

Tabela 4 – Cronograma de moldagem e rompimento dos corpos de prova

Ordem dos experimentos	% de cinzas substituídas pela mistura	Data de rodagem do traço	Valor de abatimento em mm
1	0	29/09/2025	93
2	5	13/10/2025	70
3	10	13/10/2025	64
4	15	20/10/2025	52

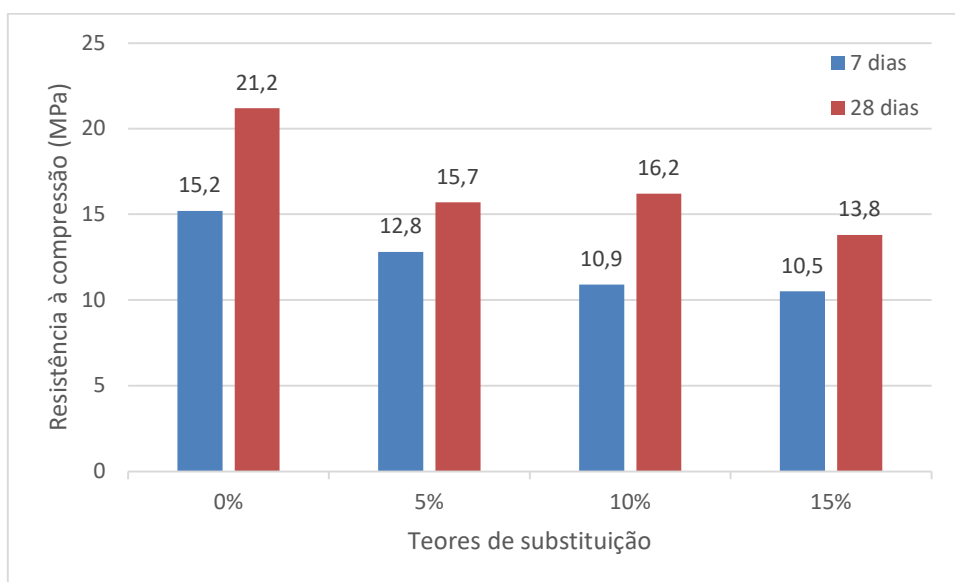
Fonte: Autora (2025)

De acordo com a NBR 8953 (ABNT, 2015), a consistência do concreto no estado fresco utilizada em elementos estruturais deve apresentar abatimento (slump) dentro do intervalo de 100 a 160 mm. No entanto, os valores de abatimento obtidos para todos os teores de substituição analisados permaneceram abaixo desse limite. Assim, o material não atende às exigências normativas para a classe de consistência especificada, portanto, não se enquadra conforme os requisitos da norma.

4.4 Resistência à compressão axial

A análise dos resultados de resistência à compressão, apresentados no gráfico 1 e no Apêndice A, foi conduzida para avaliar o impacto da substituição parcial do cimento por CVE. O traço de referência (0% de substituição) demonstrou, os maiores valores de resistência aos 7 e 28 dias. Contudo, observou-se uma redução progressiva da resistência com o aumento do teor de CVE em todos os níveis (5%, 10% e 15%). É notável que aos 28 dias, nenhum dos traços com substituição atingiu a classe de resistência mínima C20 (20 MPa), estipulada pela NBR 8953 (ABNT, 2015) como requisito para concretos com fins estruturais.

Gráfico 1 - Resistência à compressão axial



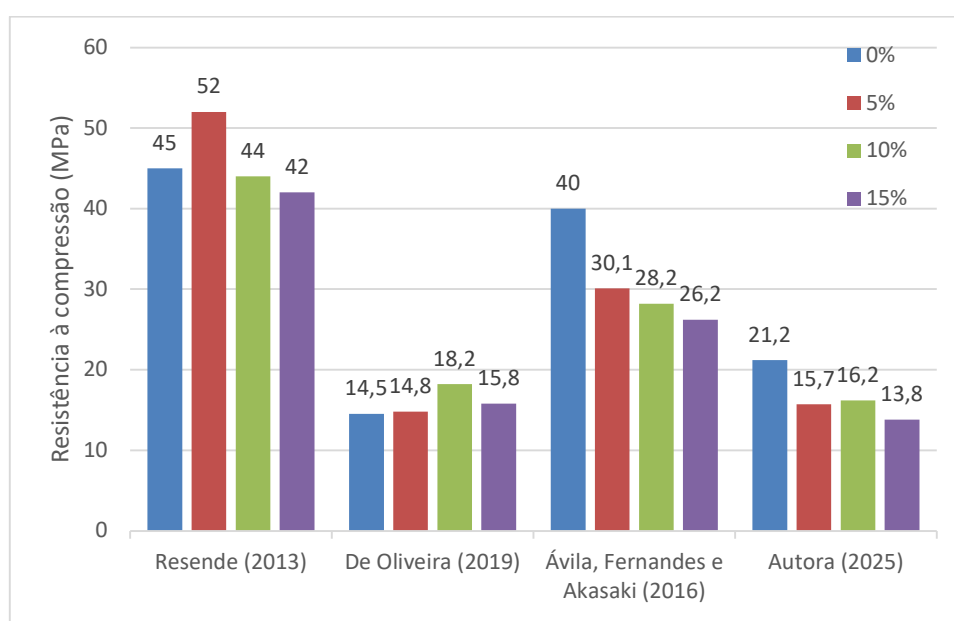
Fonte: Autora (2025)

A tendência de queda na resistência corrobora com estudos como o de Ávila, Fernandes e Akasaki (2016), que também observaram um decréscimo de desempenho com o aumento da substituição por cinza de biomassa. A principal justificativa para este comportamento reside nas características do material utilizado, pois a análise de atividade pozolânica demonstrou que a CVE não atende aos requisitos da NBR 12653 (ABNT, 2014), indicando baixa reatividade química. Desta forma, a cinza atuou como um material de preenchimento (efeito filer), substituindo um componente cimentício ativo por um material mais inerte, o que leva à diluição do cimento e à consequente redução da resistência.

Embora os resultados deste trabalho apontem para uma queda de desempenho, a literatura presente no gráfico 2 apresenta dados divergentes. Trabalhos como os de Resende

(2013) e De Oliveira (2019) registraram ganhos de resistência com 5% de substituição por cinzas de eucalipto e bagaço de cana, respectivamente. Essa discrepância reforça que as propriedades da cinza (como a composição química, finura e estrutura amorfa) são determinantes para seu sucesso como pozolana, e não apenas sua origem. A metodologia de escolha dos teores de substituição do ensaio, mostra-se convergente entre os estudos, com teores de 0% a 15% sendo a faixa mais comum para pesquisas, o que valida o escopo adotado nesta pesquisa.

Gráfico 2 - Resistência à compressão de trabalhos semelhantes



Fonte: Autora (2025)

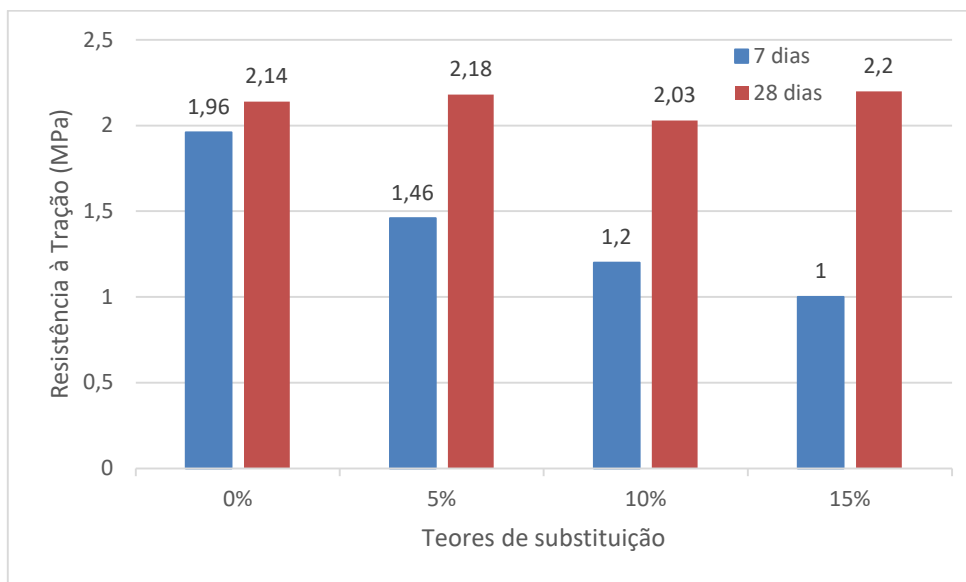
4.5 Resistência à tração por compressão diametral

O ensaio de resistência à tração realizado aos 7 e 28 dias, ilustrada no gráfico 3 e no Apêndice B, apresenta comportamento distinto do material em função da idade do concreto. Aos 7 dias, verifica-se uma queda no desempenho à medida que aumenta o teor de CVE. O traço de referência (0%) alcançou 1,96 MPa, enquanto os traços com 5%, 10% e 15% de substituição apresentaram declínio, atingindo 1,46 MPa, 1,20 MPa e 1,00 MPa, respectivamente.

Em contrapartida, o comportamento aos 28 dias revela uma evolução. Todos os traços demonstraram um ganho de resistência em relação aos 7 dias. É relevante ressaltar que os traços

com 5% e 15% de substituição, ao atingirem 2,18 MPa e 2,20 MPa, respectivamente, superaram o desempenho do traço de referência (2,14 MPa).

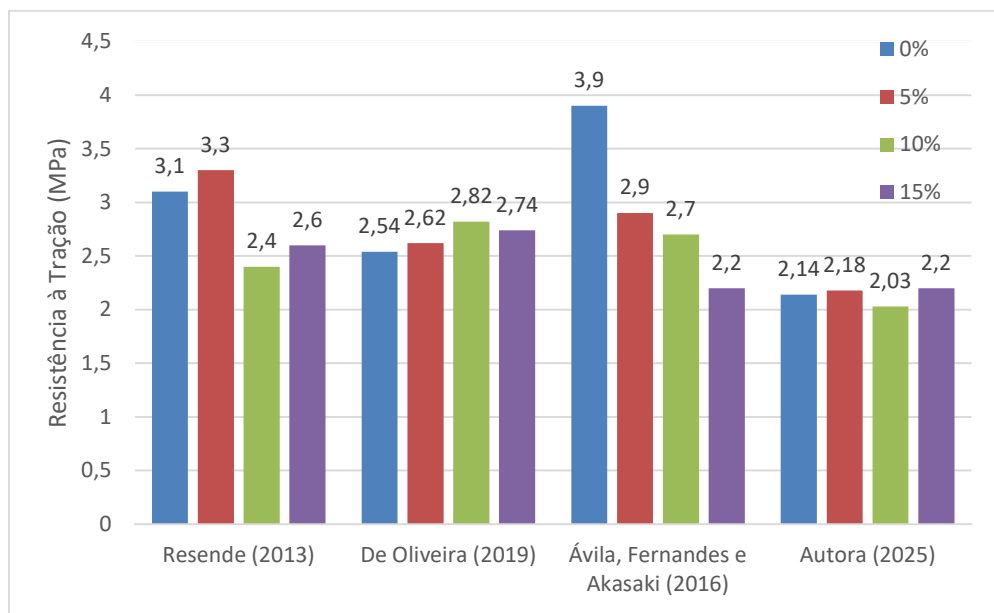
Gráfico 3 - Resistência à tração por compressão diametral



Fonte: Autora (2025)

Para validar os resultados obtidos, realizou-se uma comparação com trabalhos de outros autores que investigaram a substituição de cimento por diferentes tipos de cinzas, apresentado no gráfico 4. A análise comparativa revela que não há um consenso na literatura sobre os resultados da substituição. O trabalho de Ávila, Fernandes e Akasaki (2016) mostra uma tendência similar à observada nas idades iniciais deste estudo, com uma queda de desempenho com o aumento do teor de substituição. Por outro lado, os resultados deste trabalho aos 28 dias se assemelham aos de Resende (2013) e De Oliveira (2019), que também observaram desempenho em determinados teores de substituição. Essa divergência na literatura, evidencia que a viabilidade da substituição do cimento por cinzas não é universal, dependendo de fatores como a composição química, a finura e a morfologia da cinza.

Gráfico 4 - Resistência à tração de trabalhos semelhantes



Fonte: Autora (2025)

Do ponto de vista normativo, a NBR 12653 (ABNT, 2014) não estabelece valores mínimos, mas permite estimá-la a partir da resistência à compressão (f_{ck}). Para um concreto C20 (f_{ck} de 20 MPa), que é o mínimo estrutural, a resistência à tração esperada é de aproximadamente 2,21 MPa. Ao comparar os resultados experimentais com esta referência, observa-se que o traço com 15% de substituição (2,20 MPa) atingiu um valor parecido ao esperado para um concreto C20, enquanto os demais traços se aproximaram deste patamar.

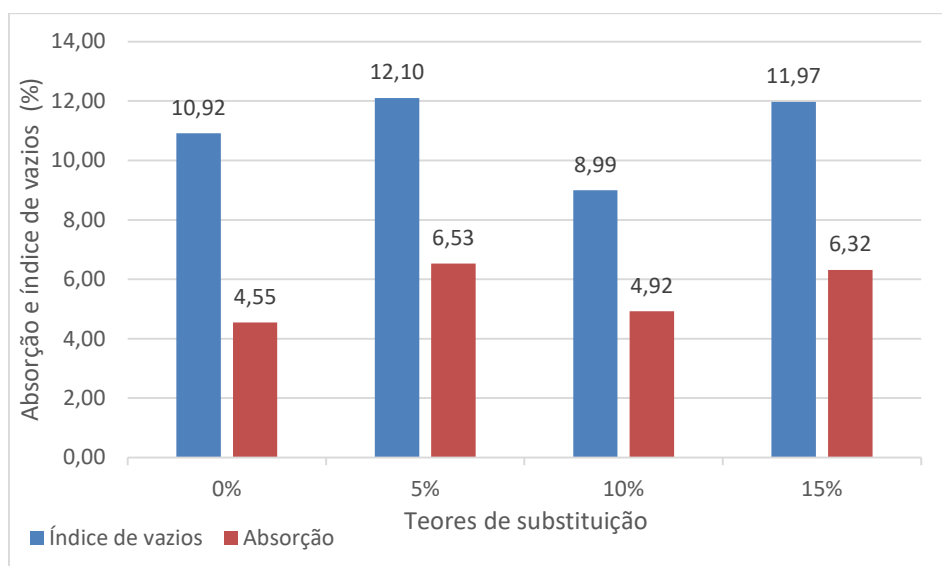
4.6 Absorção de água

O gráfico 5 demonstra uma correlação entre as duas propriedades: índice de vazios e absorção de água conforme exigências da NBR 9778 (ABNT, 2009). O comportamento dos traços seguiu uma tendência que revelou informações sobre o efeito da cinza na microestrutura do concreto.

A análise da porosidade revelou um comportamento não linear com a substituição de CVE. Enquanto o traço de referência (0%) apresentou uma matriz compacta (4,5% de

absorção), a substituição de 5% e 15% de cinza aumentou a porosidade, com índices de absorção acima de 6,3%. O teor de 10% de substituição demonstrou um desempenho superior aos demais, registrando o menor índice de vazios (8,99%), sendo este resultado considerado o “ponto ótimo”, no qual a cinza atuou de forma mais eficaz no preenchimento de vazios (efeito filler), resultando em uma matriz mais densa e menos permeável até mesmo que a do concreto convencional.

Gráfico 5 – Absorção e índice de vazios (%)



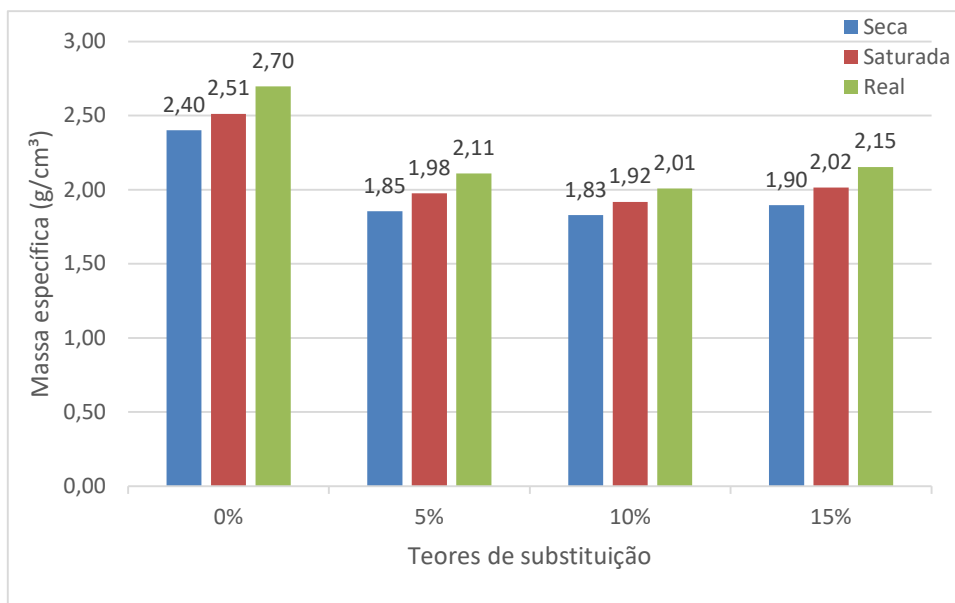
Fonte: Autora (2025)

A pesquisa de Resende (2013) revela um resultado semelhante ao encontrado no teor de 10% de substituição, indicando que a incorporação nesse percentual promove a redução da absorção de água. Em complemento, Chusilp et al (2009) descreve uma redução na permeabilidade de concretos que empregaram cinzas em substituição ao cimento nos teores de 10%, 20% e 30%, com a redução da permeabilidade sendo diretamente proporcional ao aumento do teor de substituição. Em contrapartida aos resultados de Neville (1997), todos os traços testados neste estudo apresentaram absorção inferior a 10%.

A análise da massa específica seca, apresentada no gráfico 6, demonstra uma alteração na classificação do concreto em função dos teores de substituição parcial do cimento por CVE. O traço de referência (0%) apresentou valor de 2,40 g/cm³ (2.400 kg/m³), enquadrando-se, conforme a NBR 9778 (ABNT, 2009), na classe de Concreto Normal (C), por situar-se no intervalo entre 2.000 kg/m³ e 2.800 kg/m³. No entanto, mesmo no menor teor avaliado (5%), ocasionou uma redução da massa específica seca para 1,85 g/cm³ (1.850 kg/m³),

comportamento que se manteve nos teores de 10% (1,83 g/cm³) e 15% (1,90 g/cm³). Dessa forma, os concretos produzidos com substituição passaram a ser classificados como Concreto Leve (CL), visto que todos os valores obtidos permaneceram abaixo do limite mínimo de 2.000 kg/m³ estabelecido pela norma, evidenciando que a incorporação da CVE influencia diretamente a densidade do compósito.

Gráfico 6 – Massa específica (g/cm³)



Fonte: Autora (2025)

5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

A presente pesquisa avaliou a caracterização da CVE, indicando que o material não atende aos requisitos normativos da NBR 12653 (ABNT, 2014) para ser classificado como pozolana, tanto sob o aspecto químico, uma vez que a soma dos óxidos de SiO_2 , Al_2O_3 e Fe_2O_3 totalizou 56,9%, quanto sob o critério de físicos, devido à predominância de partículas no intervalo entre 300 μm e 600 μm . Esses resultados auxiliaram na interpretação do desempenho do concreto, indicando que a CVE atuou como material de preenchimento, intensificando o efeito filer.

Os resultados confirmaram a viabilidade da utilização do resíduo, embora tenham indicado uma redução na trabalhabilidade, conforme evidenciado pela queda do slump test de 93 mm (0%) para 52 mm (15%) no maior teor de substituição. Em termos de desempenho mecânico, a resistência à compressão apresentou decréscimo em todos os teores de substituição em relação ao traço de referência (21,2 MPa). Em contraste, a resistência à tração demonstrou um comportamento mais favorável, com os teores de 5% (2,18 MPa) e 15% (2,2 MPa) superando o desempenho do traço de trabalho (2,18 MPa). Contudo, a análise das propriedades de durabilidade revelou que o teor de 10% de CVE demonstrou ser o que melhor otimiza as propriedades de durabilidade, ao apresentar os menores valores de índice de vazios (8,99%) e absorção de água (4,92%).

Não obstante, é imperativo reconhecer as limitações inerentes a este estudo. A principal delas reside na redução da resistência à compressão, o que pode exigir o uso de aditivos ou um maior tempo de cura para que o concreto atinja a resistência de projeto em aplicações estruturais. Além disso, a pesquisa limitou-se a ensaios de curto prazo, não permitindo inferências conclusivas sobre a durabilidade do material em longo prazo ou sua resistência a ataques químicos específicos, como a carbonatação e a penetração de cloretos.

Com base nos achados, sugere-se para trabalhos futuros as três frentes principais. Primeiramente, é fundamental a realização de ensaios de resistência e durabilidade em idades avançadas (90 e 180 dias) para confirmar as propriedades do concreto. Em segundo lugar, recomenda-se a investigação do uso de aditivos superplastificantes para otimizar a trabalhabilidade e, potencialmente, recuperar parte da resistência à compressão perdida. Por último, a realização de ensaios de durabilidade específicos, como a resistência à carbonatação e a ensaios acelerados de lixiviação, para validar o potencial de melhoria da durabilidade

sugerido pelos resultados de absorção e índice de vazios. Adicionalmente, sugere-se o estudo de processos de beneficiamento da CVE, como a moagem, visando aumentar sua área superficial e, conseqüentemente, sua reatividade, o que pode resultar em melhorias no desempenho mecânico do concreto. Tais estudos contribuirão para a consolidação da CVE como um material cimentício suplementar sustentável e eficaz.

REFERÊNCIAS

ALVES, José Dafico. **Manual de tecnologia do concreto**. Editora da Universidade Federal de Goiás, 1982.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. ASTM C618: Standard specification for coal fly ash and raw or calcined natural pozzolan for use in concrete. West Conshohocken: ASTM International, 2005.

ANDOLFATO, Rodrigo Piernas. Controle tecnológico básico do concreto. NEPAE. Ilha Solteira, 2002.

APRIANTI, E.; SHAFIGH, P.; BAHRI, S. & FARAHANI, J. N. Supplementary cementitious materials origin from agricultural waste – **A Review**. Construction and Building Materials. Vol. 74, p.176-187, 2015.

ABCP - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE CIMENTO PORTLAND: **Guia básico de utilização do cimento Portland**. São Paulo, Boletim Técnico BT-106, 2002, 27 p.

ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 12653**: Materiais pozolânicos - Requisitos. 3 ed. Rio de Janeiro, 2015.

_____. **NBR 13956-1**: Sílica ativa para o uso com cimento Portland em concreto, argamassa e pasta. 1 ed. Rio de Janeiro, 2012.

_____. **NBR 16697**: Cimento Portland - Requisitos. 1 ed. Rio de Janeiro, 2018.

_____. **NBR 16889**: Concreto - Determinação da consistência pelo abatimento do tronco de cone. 1 ed. Rio de Janeiro, 2020.

_____. **NBR 5738**: Concreto – Procedimento para moldagem e cura de corpos de prova. 2 ed (versão corrigida). Rio de Janeiro, 2016.

_____. **NBR 5739**: Concreto - Ensaio de compressão de corpos de prova cilíndricos. 3 ed.

_____. **NBR 7181**: Solo - Análise granulométrica. 3 ed. Rio de Janeiro, 2025.

_____. **NBR 7211**: Agregados para concretos - Requisitos. 4 ed. Rio de Janeiro, 2022.

_____. **NBR 7222**: Concreto e argamassa - Determinação da resistência à tração por compressão diametral de corpos de provas cilíndricos. 3 ed. Rio de Janeiro, 2015.

_____. **NBR 8953**: Concreto para fins estruturais – Classificação pela massa específica, por grupos de resistência e consistência. 3 ed. Rio de Janeiro, 2011.

_____. **NBR 9778**: Argamassa e concreto endurecidos - Determinação da absorção de água, índices de vazios e massa específica. 2 ed. Rio de Janeiro, 2009.

ASTM - **ASTM INTERNATIONAL**. C150–07: Standard specification for Portland cement. West Conshohocken: ASTM International, 2009. (Vol. 4.01).

ÁVILA, Tainara Cristina; FERNANDES, Sérgio Eduardo; AKASAKI, Jorge Luís. A influência da substituição de cimento por cinza do bagaço de cana-de-açúcar (CBC) em concretos. **Revista Científica ANAP Brasil**, São Paulo, Brasil, v. 9, n. 17, 2016. DOI: 10.17271/1984324091720161447. Disponível em: https://publicacoes.amigosdanatureza.org.br/index.php/anap_brasil/article/view/1447. Acesso em: 21 nov. 2025.

BESSA, S.A.L. Utilização da cinza do bagaço da cana-de-açúcar como agregado miúdo em concretos para artefatos de infraestrutura urbana. Tese (Doutorado) – Engenharia urbana, Universidade Federal de São Carlos. São Carlos, 2011

BORLINI, M. C. et al. Cinza da lenha para aplicação em cerâmica vermelha Parte I: características da cinza (Firewood ash for application in red ceramic Part I: characteristics of the ash). *Cerâmica*, v. 51, p. 192-196, 2005.

CASAGRANDE, César Augusto et al. Efeito da substituição do cimento por cinza volante em concretos autoadensáveis de alto desempenho. **Revista Técnico-Científica**, 2019.

CHINDAPRASIRT, P.; HOMWUTTIWONG, S.; SIRIVIVATNANON, Vute. Influence of fly ash fineness on strength, drying shrinkage and sulfate resistance of blended cement mortar. **Cement and Concrete Research**, v. 34, n. 7, p. 1087-1092, 2004.

CHINDAPRASIRT, Prinya; JATURAPITAKKUL, Chai; SINSIRI, Theerawat. Efeito da finura da cinza volante na microestrutura da pasta de cimento misturada. **Construction and Building Materials**, v. 21, n. 7, p. 1534-1541, 2007.

CHUSILP, N.; JATURAPITAKKUL, C.; KIATTIKOMOL, K. Utilization of bagasse ash as a pozzolanic material in concrete. **Construction and Building Materials**. V. 23, p. 3352- 3358. 2009.

CP III - Cimento Portland de Alto Forno. Disponível em: <https://cimento.org/cp-iii-32-cimento-portland-de-alto-forno>. Acesso em: 12 jun. 2025.

DA FONSECA, Gustavo Celso. **Adições minerais e as disposições normativas relativas à produção de concreto no Brasil: uma abordagem epistêmica**. 2010. de Janeiro, 2024. Disponível em: <http://snic.org.br/assets/pdf/resultadospreliminares/1736861397.pdf>. Acesso em: 14 nov. 2025

DE OLIVEIRA, Wesley Silva et al. **Uso de cinzas brutas de bagaço de cana-de-açúcar como material substitutivo no concreto**. 2021.

DEY, D.; SRINIVAS, D.; PANDA, B.; SURANENI, P.; & SITHARAM, T. G. Use of industrial waste materials for 3D printing of sustainable concrete: A review. **Journal of cleaner production**, v. 340, 2022.

FOELKEL, Celso. Resíduos Sólidos Industriais do Processo de Fabricação de Celulose Kraft de Eucalipto: Resíduos Minerais. **Eucalyptus Online Book**. São Paulo, v. 25, n. 5, out. 2011. Disponível em: https://www.eucalyptus.com.br/eucaliptos/PT25_ResiduosMinerais.pdf. Acesso em 06 jun. 2025.

FRANÇA, Débhora Flávia Soto et al. Avaliação da reologia, da RAA e das propriedades de argamassas no estado fresco utilizando cinza de eucalipto como substituição parcial ao cimento Portland. **Ambiente Construído**, v. 16, n. 3, p. 153-166, 2016.

HELENE, Paulo; TERZIAN, Paulo. **Manual de dosagem e controle do concreto**. São Paulo: PINI, 1992.

HERATH, Charith et al. Desempenho de concreto de alto volume com cinzas volantes incorporando aditivos: Uma revisão sistemática da literatura. **Construction and Building Materials**, 2020.

ISAIA, Geraldo Cechella (Ed.). Materiais de Construção Civil e Princípios de Ciência e Engenharia de Materiais ed. G. C. Isaia. 3ªed. São Paulo, **IBRACON**, 2017. Volume1.

LOH, Kenneth; NAGARAJIAH, Satish (Ed.). **Desenvolvimentos inovadores de nanocompósitos multifuncionais avançados em engenharia civil e estrutural**. Woodhead Publishing, 2016.

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

MEHTA, Povindas Kumar; MONTEIRO, Paulo José Melaragno. **Concreto: estrutura, propriedades e materiais**. São Paulo, SP: Pini, 1994.

MEHTA, Povindas Kumar; MONTEIRO, Paulo José Melaragno. **Concreto: microestrutura, propriedades e materiais**. São Paulo, SP: IBRACON, 2008.

FIGUEIREDO, Neto. **Avaliação das propriedades no estado endurecido de argamassas com a utilização de resíduos da queima de biomassa da indústria cerâmica**. Palmas, 2024.

NEVES, Idécio França Das. Materiais de construção: Estudo de dosagem racional de concreto estrutural comum. Pontifícia universidade católica do Paraná CuritibaPR. 2009. Acesso em: 14 de novembro de 2025.

NEVILLE, A. M. **Propriedades do Concreto**. São Paulo. Editora PINI, 1997.

NEVILLE, A.M.; BROOKS, J.J. **Concrete Technology**. 2. ed. Harlow: Pearson, 2010.

NEVILLE, Adam M. **Propriedades do concreto**-5. Edição. Bookman Editora, 2015.

OLIVEIRA, C.F. **Análise das propriedades do concreto quando utilizado após início de pega: tempo de utilização de concreto estrutural vencido**. Tese (Mestrado) – Faculdade de Engenharia, Universidade Federal de Minas Gerais. Belo Horizonte, 2018.

PETERSON, Michael et al. Estudo da incorporação de cinza proveniente da queima de lenha de eucalipto na formulação de massa de uma indústria cerâmica estrutural do sulcatarinense. **Revista da UNIFEBE**, v. 1, n. 15, p. 9-17, 2016.

RASEKH, Haleh et al. Reologia e trabalhabilidade do CAA. In: Concreto autoadensável: materiais, propriedades e aplicações. **Woodhead Publishing**, 2020. p. 31-63.

RECENA, Fernando Antônio Piazza. **Método de Dosagem de Concreto pelo Volume de Pasta Com Emprego de Cinza Volante**. 2011. 263 f. Tese (Doutorado em Engenharia Civil). Escola de Engenharia. Porto Alegre. 2011. Disponível em: <https://lume.ufrgs.br/handle/10183/36331>. Acesso em: 05 jun. 2025.

RESENDE, Domingos Sávio de. **Estudo do efeito da incorporação de cinzas de cavaco de eucalipto como material cimentício suplementar**. 2013.

RESENDE, Domingos Sávio **Expansibilidade por reação álcali-agregado (raa) em concretos com adição de cinzas de cavaco de eucalipto (cce)**, 2013. Rio de Janeiro, 2018.

ROMANO, Roberto Cesar de Oliveira; CARDOSO, Fábio Alonso; PILEGGI, Rafael Giuliano. Propriedades do concreto no estado fresco. **Concreto: ciência e tecnologia**, v. 1, p. 453-500, 2011.

SAMPAIO, Zodínio Laurisa Monteiro; SOUZA, Paulo Alysson Brilhante Faheina; GOUVEIA, Bruno Guida. Analysis of the influence of the sugar cane bagasse ashes on mechanical behavior of concrete. **Revista IBRACON de Estruturas e Materiais**, v. 7, p. 626-647, 2014.

SANTOS, A. C.; MONTEIRO, L.; PAULO, E.; PAULO, H. Análise de argamassas confeccionadas com a cinza do bagaço de cana-de-açúcar. FUMEC, **Revistas**. 2013. Disponível em: <http://www.fumec.br/revistas/construindo/article/view/4011/1992>. Acesso em: 23/11/2025.

SIDDIQUE, Rafat; (Ed.). Concreto Sustentável Feito com Cinzas e Pó de Diferentes Fontes: Materiais, Propriedades e Aplicações. **Woodhead Publishing**, 2021.

SINDICATO NACIONAL DA INDÚSTRIA DO CIMENTO (SNIC): **Relatório Anual**. Rio.2024 Disponível em: <http://snic.org.br/assets/pdf/resultados-preliminares/1736861397.pdf>. Acesso em: 23/11/2025.

ZUCARELI, Vitor Leandro et al. Corrosão do aço em estruturas de concreto armado. **Brazilian Journal of Development**, v. 7, n. 2, p. 14349-14354, 2021.

APÊNDICE A - Resistência à compressão

Traço referência (0%) - 28 dias

IFTO - Campus Palmas

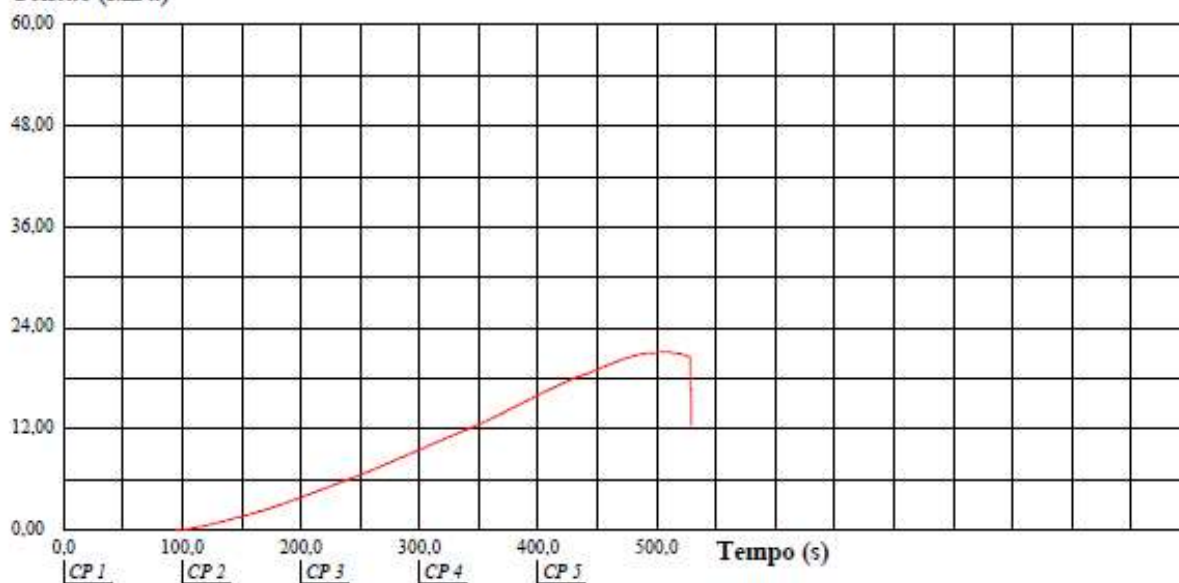
Laboratório de Materiais de Construção

Relatório de Ensaio

Máquina: **Emic DL10000** Célula: **Trd 30** Extensômetro: - Data: **27/10/2025** Hora: **18:56:37** Trabalho n° **2801**
 Programa: **Tesc versão 3.01** Método de Ensaio: **Compressão concreto 180_OK**
 Ident. Amostra: >>> Cliente: **Beatriz e Cleicy - Traço referência** Data de moldagem: **29/09/2025** Idade da amostra: **28 dias**

Corpo de Prova	Diâmetro (mm)	Compr. Base (mm)	Força @Força Max. (N)	Tensão @Força Max. (MPa)
CP 1	100	200	166307,3	21,2
Número CPs	1	1	1	1
Média	100,0	200,0	166300	21,17
Coef.Var.(%)	*	*	*	*

Tensão (MPa)



APÊNDICE B - Resistência à tração

Traço referência (0%) - 28 dias

Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Tocantins
Laboratório de Materiais de Construção

Relatório de Ensaio

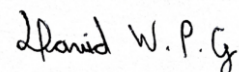
Máquina: **Emic DL10000** Célula: **Trd 30** Extensômetro: - Data: **27/10/2025** Hora: **19:49:23** Trabalho n° **2808**
Programa: **Tesc versão 3.01** Método de Ensaio: **Tração compr diam 180tf_OK**
Ident. Amostra: >>>>> Cliente: **Beatriz e Cleycele - Traço referência** Data moldagem: **29/09/2025** Idade amostra: **28 dias**

Corpo de Prova	Diâmetro	Altura	Carga de Ruptura	Resistência à Compressão Diametral (MPa)
	(mm)	(mm)	(N)	
CP 1	100,00	200,00	67317,57	2,14
Número CPs	1	1	1	1
Média	100,0	200,0	67320	2,143
Desv.Padrão	*	*	*	*
Coef.Var.(%)	*	*	*	*
Mínimo	100,0	200,0	67320	2,143
Máximo	100,0	200,0	67320	2,143

ANEXO A - Fluorescência de raios

RELATÓRIO DE CARACTERIZAÇÃO QUÍMICA

Equipe Responsável
Elaboração 03/11/2025



David Willyan Pereira Gomides
Fluorescência de Raios X

Revisão 03/11/2025



Dr. Vinicius Ferraz Guimarães
Coordenação CRTI



Prof. Dr. José De Araújo Nogueira Neto
Coordenação CRTI

Data
03/11/2025

Relatório final referente a proposta número 1572, OS 145725, elaborado para Evandro Schmitt.

SUMÁRIO

SUMÁRIO	2
1. INFORMAÇÕES GERAIS	3
2. MÉTODOS	4
2.1. Preparação de Amostras	4
2.1.1. Método de preparo de amostra para análise dos óxidos maiores por fluorescência de raios X	4
2.1.2. Método de preparo de amostra para análise de elementos menores por fluorescência de raios X	4
2.2. Técnicas Analíticas	4
2.2.1. Fluorescência de Raios X	4
3. RESULTADOS	4
3.1.1. Óxidos maiores por fluorescência de raios X (FRX)	5
3.1.2. Elementos menores por fluorescência de raios X (FRX)	6

1. INFORMAÇÕES GERAIS

Cliente: Evandro Schmitt

Solicitante: Beatriz Lustosa Almeida

E-mail: Evandro.schmitt@ito.edu.br / eng.civil.schmitt@gmail.com

Relatório final referente a proposta número 1572, elaborado para Evandro Schmitt, contendo a caracterização geoquímica de uma amostra. A análise foi realizada por:

✓ Fluorescência de Raios X (FRX)

A denominação da amostra foi adotada pelo cliente.

A amostra foi coletada e fornecida pelo cliente. O CRTI não participou da definição dos critérios de amostragem e coleta.

1) AMOSTRA DE CINZA VOLANTE DE EUCALIPTO RETIRADAS DE UM SECADOR DE GRÃOS

2. MÉTODOS

2.1. Preparação de Amostras

2.1.1. Método de preparo de amostra para análise dos óxidos maiores por fluorescência de raios X

Uma alíquota de aproximadamente 5,0 gramas de amostra foi separada por quartejamento e pulverizada em moinho planetário de bolas, equipado com elementos de moagem de ágata por 10 minutos. Após a moagem, a amostra foi seca em estufa a 105 °C por 12 horas e destinadas à determinação da perda na ignição (LOI) ou ganho na ignição (GOI).

Para determinação do LOI ou GOI, a amostra foi calcinada a 1000 °C por 5 horas. Em seguida, uma alíquota de 1,0 grama da amostra, previamente calcinada foi fundida com 9,0 gramas de tetraborato de lítio.

2.1.2. Método de preparo de amostra para análise de elementos menores por fluorescência de raios X

Uma alíquota de aproximadamente 15,0 gramas de amostra foi separada por quartejamento e pulverizada em moinho planetário de bolas, equipado com elementos de moagem de ágata por 10 minutos. Após a moagem, a amostra foi seca em estufa a 105 °C por 12 horas e destinada à confecção da pastilha prensada. A pastilha foi confeccionada misturando e homogeneizando 3,0 gramas de aglutinante com 9,0 gramas da amostra previamente seca. Em seguida, a mistura foi prensada com uma força de 15 toneladas.

2.2. Técnicas Analíticas

2.2.1. Fluorescência de Raios X

A medida de fluorescência de raios X (FRX) foi realizada em um espectrômetro WDS *Bruker S8 Tiger*, equipado com tubo de Rh. Para análise dos elementos maiores, utilizou-se o pacote *GeoQuant M[®] Bruker*, e também um conjunto de padrões adicionais certificados, composto por padrões de rochas e minerais naturais. Os valores obtidos são expressos em porcentagem (%) em massa, em base úmida. Para análise dos elementos menores, as concentrações foram obtidas por pacote de curvas *GeoQuant T[®] Bruker*. Os valores obtidos são apresentados em partes por milhão (ppm).

3. RESULTADOS

As nomenclaturas das amostras foram mantidas conforme rótulo original. Os resultados das análises químicas dos óxidos maiores e elementos menores obtidos por fluorescência de raios X, estão exibidos na tabela 1 e 2.

3.1.1. Óxidos maiores por fluorescência de raios X (FRX)

Tabela 1 - Análise química dos óxidos maiores analisados.

Óxidos Analisados (%)	AMOSTRA ANALISADA BASE ÚMIDA
	CINZA VOLANTE DE EUCALIPTO
SiO ₂	53,19
TiO ₂	0,19
Al ₂ O ₃	1,44
Fe ₂ O ₃	2,26
MnO	0,80
MgO	4,70
CaO	17,12
Na ₂ O	1,10
K ₂ O	2,04
P ₂ O ₅	3,51
SO ₃	< LQ
LOI	14,63
Soma (%)	100,98

(< LQ) = Abaixo do limite de quantificação.

3.1.2. Elementos menores por fluorescência de raios X (FRX)

Tabela 2 - Análise química dos elementos menores analisados.

Limite de Detecção Mínimo (ppm)	Elementos Analisados (ppm)	CINZA VOLANTE DE EUCALIPTO
5	Sc	< LQ
15	V	20
20	Cr	< LQ
10	Co	< LQ
10	Ni	12
15	Cu	89
20	Zn	3329
5	Ga	8
10	As	< LQ
10	Rb	17
20	Sr	793
15	Y	< LQ
20	Zr	179
5	Nb	< LQ
20	Mo	< LQ
10	Cd	< LQ
10	Sn	< LQ
10	Sb	< LQ
50	Ba	705
15	La	< LQ
20	Ce	< LQ
15	Pb	< LQ
10	Th	10
10	U	12

(< LQ) = Abaixo do limite de quantificação.