

ESTUDO DO APROVEITAMENTO DE CINZA DE CANA DE AÇUCAR COMO SUBSTITUIÇÃO POZOLÂNICA EM CONCRETO APLICADO NA CONSTRUÇÃO CIVIL

STUDY OF THE USE OF SUGARCANE ASH AS A POZZOLANIC REPLACEMENT IN CONCRETE APPLIED IN CIVIL CONSTRUCTION

¹PEREIRA, Angelica Prado; ²FARIAS, Milena Martins; ³SILVA, Wellington Formentini; ⁴ORTOLAN, Víctor Zômpero

¹⁻³Departamento de Engenharia Civil -Centro Universitário das Faculdade Integradas de Ourinhos – Unifio/ FEMM

RESUMO

O concreto, essencial na construção civil por sua durabilidade e resistência, empregado principalmente a utilização do cimento Portland, sendo a sua produção responsável por aproximadamente 7% das emissões globais de CO₂. Para reduzir esse impacto ambiental, pesquisas como de Cardoso, *et al* (2003) e Viera (2005), relevam que a utilização de resíduos industriais como substituto parcial do cimento pode ser uma solução eficaz para mitigar as emissões de CO₂ associadas à produção de cimento. A cinza de cana-de-açúcar, um subproduto provindo da queima do bagaço de cana em usinas como a Usina São Luiz em Ourinhos-SP se destaca com uma alternativa. Segundo os estudos de Cardoso, *et al* (2003, p. 06) e De Paula *et al* (2008), apontam que as cinzas possuem propriedades Pozolônicas que reagem com o hidróxido de cálcio do cimento, possivelmente melhorando a resistência e a durabilidade do concreto e diminuindo a necessidade do cimento. Esse trabalho teve como objetivo avaliar o impacto das cinzas de cana-de-açúcar nas propriedades do concreto, como a resistência a compressão e a durabilidade, visando promover benefícios ambientais e econômico na construção civil.

Palavras-chaves: Cinzas de Cana-de-Açúcar; Resistência do Concreto; Emissão de CO₂; Propriedades Pozolônicas; Durabilidade do Concreto; Impactos Ambientais.

ABSTRACT

Concrete, essential in civil construction due to its durability and resistance, is mainly used in the use of Portland cement, and its production is responsible for approximately 7% of global CO₂ emissions. To reduce this environmental impact, research such as Cardoso, *et al* (2003) and Viera (2005), reveal that the use of industrial waste as a partial substitute for cement can be an effective solution to mitigate the CO₂ emissions associated with cement production. Sugarcane ash, a by-product from the burning of sugarcane bagasse in mills such as the São Luiz Mill in Ourinhos-SP, stands out as an alternative. According to the studies of Cardoso, *et al* (2003, p. 06) and De Paula, *et al* (2008), they point out that the ashes have Pozolonic properties that react with the calcium hydroxide of the cement, possibly improving the strength and durability of the concrete and reducing the need for cement. This work aimed to evaluate the impact of sugarcane ash on concrete properties, such as compressive strength and durability, aiming to promote environmental and economic benefits in civil construction.

Keywords: Sugarcane Ash; Strength of Concrete; CO₂ Emissions; Pozolonic Properties; Concrete Durability; Environmental Impacts.

INTRODUÇÃO

O concreto é um dos materiais de construção mais utilizados em todo o mundo devido à sua durabilidade, resistência à compressão e versatilidade, o basal componente presente no concreto é o cimento Portland desenvolvido no século de XIX pelo britânico Joseph Aspdin. Em concordância com Vieira (2005), apesar de suas

qualidades, trata-se de um material prejudicial ao meio ambiente pela alta emissões de dióxido de carbono (CO₂) associados as indústrias de construções, o quais responsáveis por 7% da emissão mundial de dióxido de carbono.

Diante desse cenário, a busca por alternativas mais sustentáveis tem se tornado uma prioridade. Uma alternativa é a utilização de resíduos industriais como substituto parcial do cimento na produção do concreto, entre esses resíduos, destaca-se a cinza de cana-de-açúcar como uma opção viável devido à sua disponibilidade em regiões onde é demasiadamente cultivada.

Segundo CONAB (2017), o Brasil é o maior produtor mundial de cana-de-açúcar, bastante utilizado para a produção de açúcar, etanol e outros produtos. O cultivo da cana-de-açúcar vem aumentando gradativamente, impulsionando no crescimento sustentável e econômico.

Na região Ourinhos – SP, onde foi realizado o estudo, destaca-se, dentre outras, a Usina São Luiz, unidade industrial aplicada aos processamentos de cana-de-açúcar para a produção de açúcar e etanol. De acordo com Vital (2022), a empresa foi fundada no ano de 1951, desenvolvendo um papel significativo na economia local e regional.

De acordo com trabalhadores do local uma das principais atividades realizadas na Usina São Luiz é o processamento do bagaço de cana-de-açúcar, frequentemente utilizado como combustível na geração de energia elétrica, sendo queimados em caldeiras para produzir vapor acionando as turbinas geradoras de eletricidade. Esse resíduo de subproduto gerado pela queima, denominado de cinza de cana-de-açúcar, em sua maior parte é descartado nas lavouras. Essas cinzas são compostas por minérios como óxido de cálcio, sílica, alumínio, potássio e pode também conter uma pequena porcentagem de carbono orgânico.

Segundo Cardoso *et al.* (2023, p. 06),

As cinzas de cana-de-açúcar possuem propriedades pozolânicas, ou seja, tem capacidade de reagir quimicamente com o hidróxido de cálcio (cal), presente no cimento Portland, por tanto alguns estudos indicam que essa reação entre o efeito pozolânico das cinzas, quando adicionados ao cimento em quantidades adequadas, melhora o desempenho do material, contribuindo para a resistência e durabilidade do concreto, além da redução da quantidade de cimento Portland, assim diminuindo os impactos ambientais relacionados a produção de cimento, contribuindo com a sustentabilidade no setor da construção civil. (Cardoso *et al.*, 2023, p. 06).

Em virtude do apresentado, este trabalho busca analisar o impacto da utilização das cinzas de cana-de-açúcar como matéria-prima a confecção de concreto, com ênfase no desempenho da resistência a compressão, trabalhabilidade, resistência comparativas entre o aumento do percentual das cinzas de cana de açúcar substituídas pelo cimento e ganho de resistência com o tempo, desta forma, gerar benefícios ao meio ambiente, reduzindo a emissão de CO₂ proveniente da construção civil na atmosfera e reduzir os custos de produção, utilizando matéria prima utilizada como descarte para a substituição do cimento.

MATERIAL E MÉTODOS

Neste item, serão descritos os materiais utilizados para a realização da concretagem, visando os estudos do comportamento do concreto convencional e dos concretos modificados com diferentes percentuais de cinzas de cana-de-açúcar, assim os materiais empregados são: cimento Portland, agregado miúdo, agregado graúdo, água e cinza de cana-de-açúcar.

Além disso serão relatadas as metodologias utilizadas para caracterizar os materiais empregados. Realizando estudos experimentais sobre a resistência do concreto com substituição de parte do cimento por cinza de cana-de-açúcar, com o objetivo de avaliar sua eficiência em termos de resistência e oferecer uma solução sustentável para reduzir os impactos de emissão de CO₂ associados ao cimento Portland.

Diante de pesquisas, o método de dosagem escolhido para a realização foi o ABCP (Associação Brasileira de Cimento Portland), proposto inicialmente em 1956 por Ary Torres e Carlos Eduardo Rosman (Werle, 2016). Nascimento (2018, p. 03), afirma que a Associação Brasileira de Cimento Portland (ABCP) elaborou seu método de dosagem baseado no método proposto pelo *American Concrete Institute* (ACI).

Segundo WERLE (2016, p. 15), “os traços obtidos pelo método de dosagem ABCP, são calculados através das características propostas pelos materiais utilizados no concreto, o qual é baseado na correlação entre água/cimento e agregado/cimento”. Por se tratar de um método com maior precisão, quando se comparado aos métodos empíricos, os traços obtidos tendem a ser mais econômico afirma Werle (2016, p 14).

Após o traço realizado pelo método ABCP exposto no decorrer do trabalho, serão ensaiados vinte e quatro corpos de provas com dimensões de 100 mm de

diâmetro e 200 mm de altura seguindo a normativa ABNT NBR 5739/2018, sendo eles ensaiados da seguinte forma: seis corpos de concreto convencionais, seis corpos de concreto com 5% do agregado cana-de-açúcar, seis corpos de concreto com 10% e seis corpos de concreto com 20% do mesmo, quais serão divididos e submetidos ao ensaio de compressão axial com 07 e 28 dias segundo a NBR 8739/2018, contanto também com a execução do teste de Slump.

Perante os traços obtidos, são possíveis ainda representar resultados dos cálculos da resistência de dosagem; relação entre a resistência mecânica; o fator água/cimento e o consumo de cimento, verificando da viabilidade econômica na produção do concreto com relação a substituição parcial da cinza de cana-de-açúcar.

No decorrer do artigo experimental, serão expostos detalhadamente, os estudos e cálculos, identificando as propriedades físicas e químicas dos materiais auxiliares empregados na produção do concreto, será conduzido no Centro Universitário das Faculdades Integradas de Ourinhos e conta com a infraestrutura do Laboratório de Materiais de Construção Civil da UNIFIO.

CIMENTO PORTLAND

Conforme a Norma ABNT NBR 5732/1991,

O cimento Portland comum se define como um Aglomerante hidráulico obtido pela moagem do clínquer Portland ao qual se adiciona, durante a operação, a quantidade necessária de uma ou mais formas de sulfato de cálcio. Durante a moagem é permitido adicionar a esta mistura materiais pozolânicos, escórias granuladas de alto-forno e/ou materiais carbonáticos em teores especificados no item 4.2 da norma em vigor. Entretanto Clínquer Portland trata-se de um produto onde a sua maior parte é constituída por silicato de cálcio com propriedades hidráulica, em conformidade com a norma ABNT NBR 5732/1991.

Para este artigo experimental será utilizado o Cimento Portland composto por Filler CP II-F32, com o propósito de estudar os comportamentos mecânicos do mesmo com a substituição parcial por cinzas de cana de açúcar. Segundo informações de lojistas de materiais de construção o cimento mais comum na região de Ourinhos para uso geral é o cimento composto CP II-F, utilizados nos preparos de argamassas de assentamento, argamassas de revestimento, estruturas de concreto armado, entre outros.

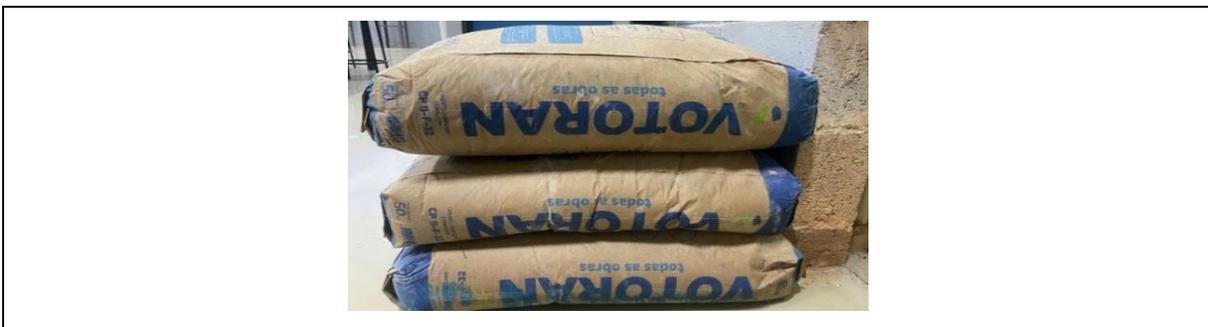
De acordo com a ABNT NBR 11578/1991,

Esse tipo de cimento é um composto constituído de 90% a 94% de clínquer mais sulfato de cálcio e de 6% a 10% de material carbonático, o que obtém

classes de 25, 32 e 40, o que representa os mínimos de resistência à compressão aos 28 dias, em MPa. (Norma ABNT NBR 5732/1991).

O cimento utilizado neste trabalho foi o CP II-F 32 conforme a figura 01.

Figura 01 - Cimento Portland CP II-F32 utilizado para os ensaios



Fonte: Autoria Própria.

AGREGADO MIÚDO

Segundo ABNT NBR 7211/2022,

São definidos como agregado miúdo, cujos grãos passam pela peneira com abertura de malha de 4,75 mm e ficam retidos na peneira com abertura de malha de 150 μm , em ensaio realizado de acordo com a ABNT NBR NM 248, com peneiras definidas pela ABNT NBR NM ISO 3310-1.

O agregado miúdo utilizado para a realização experimental encontra-se identificado na figura 02.

Figura 02 - Agregado miúdo média



Fonte: Autoria Própria

AGREGADO GRAÚDO

Segundo ABNT NBR 7211/2022,

São definidos como, agregados graúdos cujos grãos passam pela peneira com abertura de malha de 75 mm e ficam retidos na peneira com abertura de malha de 4,75 mm, em ensaio realizado de acordo com a ABNT NBR NM 248, com peneiras definidas pela ABNT NBR NM ISO 3310-1.

A norma ABNT NBR 7211/2022, ainda afirma que “as quantidades de substância nocivas não devem exceder os limites máximo em porcentagem estabelecidos, com relação à massa do material”. O agregado graúdo utilizado para a realização experimental encontra-se identificado na Figura 03.

Figura 03 - Agregado graúdo brita 0



Fonte: Autoria Própria

ÁGUA

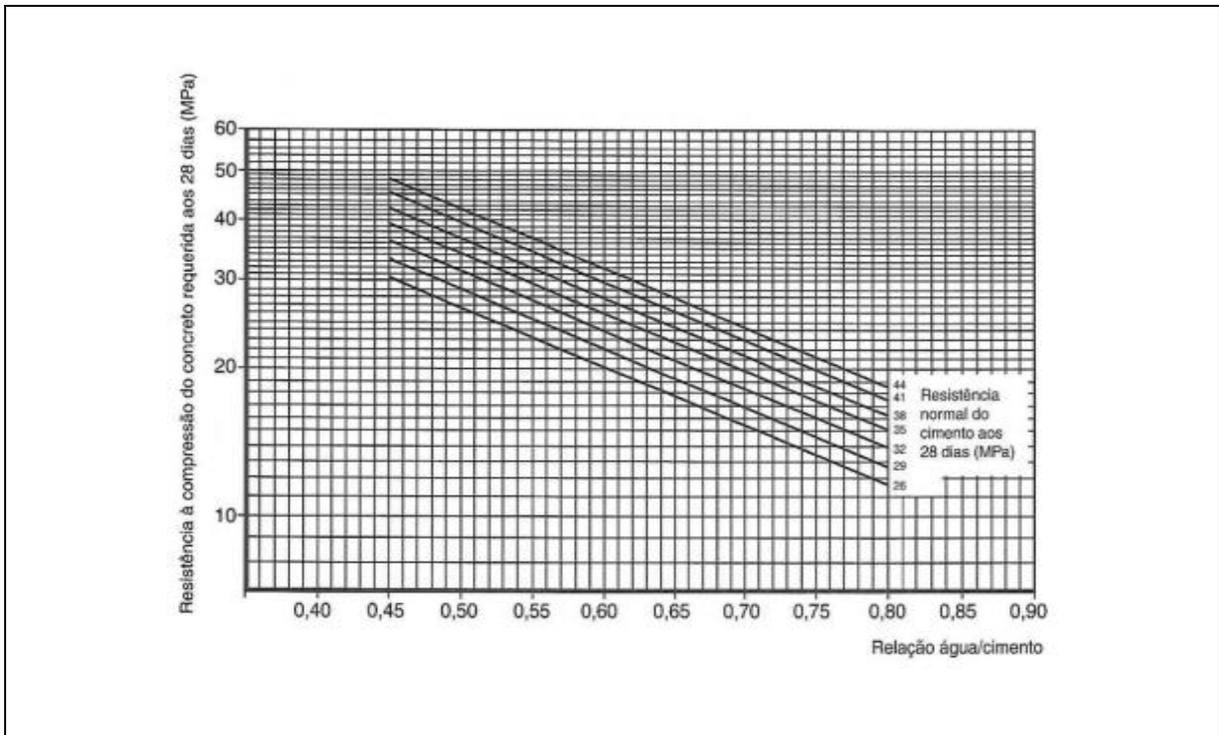
De acordo com Werle (2016, p 27), o fator água/cimento é de suma importância para o bom desempenho do concreto, visto que a água é a que permanece livre na mistura quando ainda fresca.

Seguindo as diretrizes de Borges e Carreiro (2017, p 21), essa relação deve ser a primeira escolha a qual acarretará as propriedades únicas de resistência e durabilidade do concreto. Eles ainda completam que o fator água/cimento trata-se da “razão entre o peso da água e o cimento disposto no referido traço [...]. Logo, com menor relação água/cimento será produzido um concreto com propriedades de resistência otimizada”.

Afirma Nascimento (2018, p.06), o valor água/cimento são estimados através das curvas de Abrams, contudo é determinada através do tipo de cimento, quando não proveniente da Curva de Abrams e não houver restrições com relação a

durabilidade do concreto, é possível utilizar-se a Curva de Walz, identificada na Figura 04.

Figura 04 - Curva de Walz



Fonte: <https://abcp.org.br>. Acesso em 10 de set. 2024.

Como o cimento Portland é um aglomerante hidráulico, o concreto só obterá uma resistência desejável através da dosagem correta do fator água/cimento e hidratado corretamente em seu tempo de cura. A água utilizada para a realização experimental dos ensaios, trata-se de água potável proveniente da rede de abastecimento do município de Ourinhos-SP a SAE (Sistema de Abastecimento de Água).

CINZA DE CANA-DE-AÇÚCAR

A cana-de-açúcar é uma das principais plantações cultivadas em todo o mundo, sendo utilizada muito na produção de açúcar e álcool, por meio das queimas dos seus supostos bagaços, em altas temperaturas de fornos capazes de gerar energia elétrica para manter o funcionamento das usinas que as produzem, além disso através dessa queima é possível a obtenção do material identificado como cinza de cana-de-açúcar.

Segundo Sampaio *et al.* (2014), a cinza de cana-de-açúcar tem como o seu principal composto químico a Sílica (SO₂), em quantidade normalmente acima de

60%, o que pode caracterizar esse material como pozolônico e filler. De Paula *et al.* (2008) exemplificam que:

A sílica no bagaço de cana-de-açúcar tem potencial de reação química com o Óxido de Cálcio (CaO) o qual trata-se do principal componente do cimento Portland, por tanto tais resultados apontam a possibilidade da substituição parcialmente de até 20% cimento Portland por cinzas de bagaço de cana-de-açúcar, sem comprometer a sua resistência a compressão. (De Paula *et al.*, 2008)

As cinzas utilizadas para este experimento foram doadas pela Usina São Luíz, uma das grandes potências na região de Ourinhos-SP na produção de açúcar e etanol.

A amostragem das cinzas foram coletas na data de 23 de maio de 2024, apresentava um teor de umidade alto (a) o qual prejudicaria a qualidade e desempenho do processo da concretagem, ao manusear, as partículas em atrito por meio do contato formavam um fluído aquoso de cor escura (b), como identificadas na Figura 05.

Figura 05 - (a) Umidade presente na amostra das cinzas (b) Cinzas de cana-de-açúcar em estado aquoso

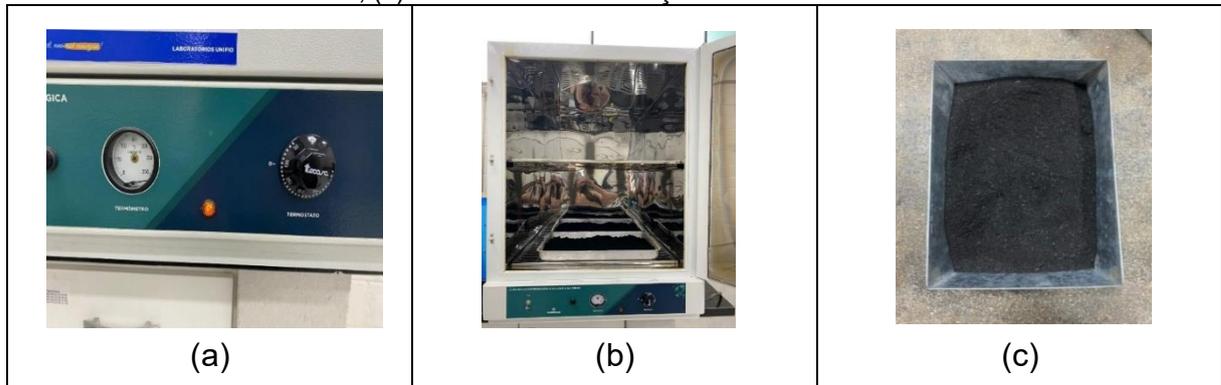


Fonte: Autoria própria

Devido ao teor de umidade presente na amostra do material foi necessário a utilização do laboratório situado no UNIFIO para o processo de secagem conforme identificados na figura 06, foi utilizada a estufa pré-aquecida em temperatura a 100 °C (a), as cinzas foram colocadas em assadeiras e levadas até a estufa por cerca de 2 horas e 30 minutos (b)

Após o processo de secagem das amostras de cinza de cana-de-açúcar, foi possível obter cinzas completamente isentas de qualquer teor de umidade (c).

Figura 06 - (a) Botão de termostato de temperatura de estufa em 100°C, (b) Processo de secagem de estufa em 100°C, (c) Cinzas de cana-de-açúcar seca



Fonte: Autoria própria

TRAÇO DO CONCRETO PELO MÉTODO ABCP

Para a realização do experimento, foram utilizados vinte e quatro corpos de prova cilíndrico com dimensões de 100 mm de diâmetro e 200 mm de altura. Desta forma a quantidade de concreto produzido foi equivalente ao volume total calculado para batimento, acrescido de 40%. Para a execução dos corpos de prova foi realizado quatro traços diferentes sendo eles; sem substituição de cinzas, com substituição de 5%, 10% e 20% do material pozolânico, portanto o volume calculado será para seis corpos de prova por traço.

Com base no consumo de água, foi utilizado um volume de 200 L/m³ devido ao alto teor de umidade presente na brita (agregado graúdo) e na areia (agregado miúdo), resultante das condições climáticas adversas, como chuvas e frio (sereno), ocorridas nas semanas anteriores e na semana atual de concretagem. Devido ao prazo e à falta de agendamento para o uso de estufas, não foi possível realizar a secagem dos agregados. Assim, foi necessário realizar uma verificação durante a preparação da mistura para determinar a necessidade de acréscimo de água.

Com base nos valores obtidos pelo método ABCP, o traço do concreto é determinado da seguinte maneira:

$$\frac{C_c}{C_c} : \frac{C_m}{C_c} : \frac{C_g}{C_c} : \frac{C_a}{C_c} \rightarrow \frac{382}{382} : \frac{783}{382} : \frac{891}{382} : \frac{200}{382}$$

Simplificando tem-se:

$$1 : 2,05 : 2,33 : 0,52 = 382 \text{ kg} \rightarrow \text{para } 1\text{m}^3 \text{ de concreto}$$

Dessa forma, o Quadro 1 apresenta o volume de concreto a ser abatido para cada tipo de mistura.

Quadro 01 - Volume do concreto a ser batido pelo método do ABCP

TIPO DE CONCRETO	CIMENTO	AGREGADO MÍUDO	AGREGADO GRAÚDO	ÁGUA	CINZA
Sem substituição de cinzas	4,97 kg	10,19 kg	11,58kg	2,6 l	-
Com 5% de substituição de cimento por cinzas	4,72 kg	10,19 kg	11,58 kg	2,6 l	0,25 kg
Com 10% de substituição de cimento por cinzas	4,47 kg	10,19 kg	11,58 kg	2,6 l	0,50 kg
Com 20% de substituição de cimento por cinzas	3,97 kg	10,19 kg	11,58 kg	2,6 l	1,00 kg

Fonte: Autoria Própria

Após a conclusão das etapas de preparação e cura dos corpos de prova, será possível medir as resistências dos concretos por meio do ensaio de compressão axial. Os cálculos necessários para o desenvolvimento deste trabalho estão descritos pelas Equações 1, 2, 3 e 4, conforme detalhado a seguir, com base nos estudos e pesquisas realizados.

A resistência à compressão individual de cada corpo de prova resultará na Resistência Característica do Concreto à Compressão (FCK), obtida por meio da Equação 1:

$$FCK = \frac{F}{A}$$

Equação 1

Onde a aceleração da gravidade considerada como 9,81 m/s² e o raio do corpo de prova medindo 0,05 m

F = Força de ruptura

A = área da seção do corpo de prova

$$A = \pi \times r^2 = \pi \times 0,05^2 = 0,00785 \text{ m}^2$$

Com base na resistência característica individual de compressão, calculada pela Equação 1, é possível determinar a resistência característica média utilizando a Equação 2, além do desvio padrão para a majoração da resistência, conforme calculado pela Equação 3.

$$FCMJ = \frac{FCK1 + FCK2 + FCK}{3} = MPa = KN/m^2$$

Equação 2

Onde:

FCMJ = Resistência média a compressão

FCK = Resistência individual a compressão

$$Sd = FCMJ \times \delta$$

Equação 3

Onde:

δ : coeficiente de variação

Sd: Desvio padrão

Para calcular a força aplicada pela prensa, é necessário converter o valor fornecido em toneladas-força para megapascais (MPa). Essa conversão é fundamental, pois a análise dos ensaios de compressão requer que a força seja expressa como pressão em megapascais, conforme indicado na equação 4.

$$FCK = \frac{\text{Força (N)}}{\text{Area (M}^2\text{)}} * 10^{-6}$$

Equação 4

Onde:

- A força é convertida para Newtons (N)

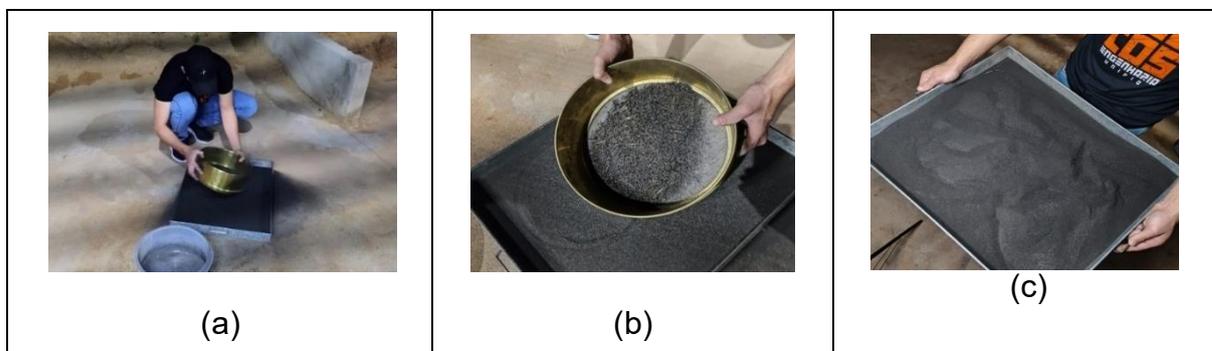
- A área da seção transversal do corpo de prova em metros quadrados (M^2)
- O fator 10^{-6} converte a pressão de pascais (Pa) para mega pascais (MPa), já que $100.000 \text{ Pa} = 1 \text{ MPa}$

Obs.: Sabendo se que 1 tonelada-força é equivalente a 9.80665 KN (quilo-newtons)

PROCESSO DE FABRICAÇÃO DOS CORPOS DE PROVAS

Para o processo de fabricação envolveu várias etapas. Inicialmente foi realizada a peneiragem manualmente das cinzas utilizando uma peneira granulométrica com abertura de 0,60mm ($600 \mu\text{m}$) (a), esse método foi utilizado para fazer a separação dos fiapos presentes na amostra que ficaram retidos na peneira (b), após esses processos as cinzas peneiradas estavam prontas para a utilização (c), observado na Figura 07

Figura 07 - (a) Peneiragem manual das cinzas, (b) Fiapos de bagaço retido na peneira de abertura 0,60 mm, (c) Cinza passada pela peneira de abertura 0,60 mm



Fonte: Autoria própria

Para a preparação dos corpos de prova, foi seguida a normativa ABNT NBR 5738/2015, utilizando fôrmas de corpos de prova cilíndricos de ferro disponibilizados pelo laboratório de engenharia da UniFIO, identificados na Figura 08.

Por falta de fôrmas de corpo de prova, a concretagem passou a ser divididas em 2 dias alterando então as datas de cura e ruptura, desta forma foi seguido o roteiro do cronograma realizados pelos alunos presentes e orientador.

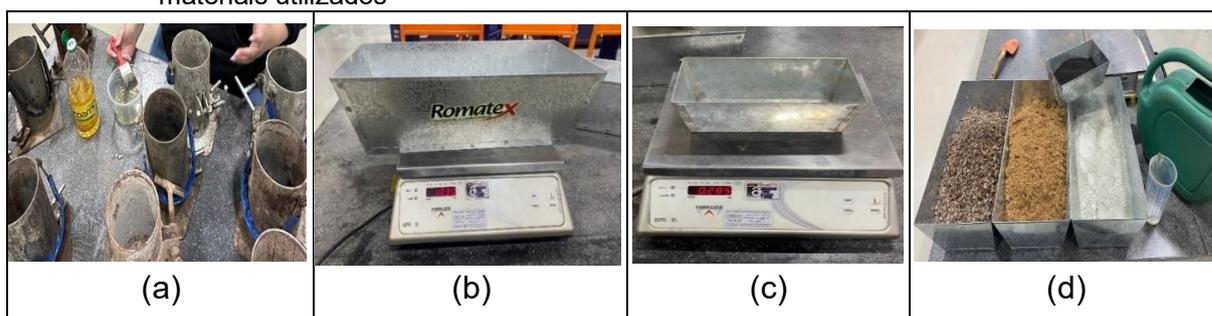
Figura 08 - Limpeza das fôrmas dos corpos de prova.



Fonte: Autoria própria.

Para o processo da concretagem dos corpos de prova foi utilizada a normativa ABNT NBR 5738/2015, com o auxílio do professor orientador Victor Zômpero. Seguindo a norma estabelecida e os traços calculados, o primeiro passo para a realização foi untar os corpos de prova com óleo de soja (a) e fazer o processo de pesagem das formas utilizadas para pesar os materiais com maior volume (b), as formas utilizadas para pesar as cinzas (c), e a pesagem e separação dos materiais (areia, brita, cimento, cinza, água e aditivo plastificante) para as misturas (d), todos os materiais pesados foram descontados os valores das formas utilizadas conforme identificada na Figura 09.

Figura 09 - (a) Corpos de prova untados com óleo de soja, (b) Pesagem da forma utilizada para a pesagem dos materiais, (c) Pesagem da utilizada para pesar a cinzas, (d) Separação dos materiais utilizados



Fonte: Autoria própria

Para a produção da massa de concreto foi utilizado a maquinária betoneira, facilitando a trabalhabilidade de mistura e deixando-a homogênea e robusta. Segundo a norma ABNT BR 12821/2009, os materiais possuem um critério específico a ser seguido para a mistura do concreto, a ordem de colocação dos materiais na betoneira exerce grande impacto na qualidade do final do produto devido a sua composição

química. Desta forma os materiais foram adicionados na respectiva ordem: Brita zero; Água + aditivo plastificante; Areia; Cimento e Cinza de cana-de-açúcar.

Após o processo de separação dos materiais, foram misturados na betoneira mediante a ordem citadas anteriormente (a). Foi possível atingir uma consistência consideravelmente rígida na massa do concreto convencional devido alguns fatores como a umidade presente nos agregados e a diminuição de água relatado no decorrer do trabalho.

Em virtude disso, houve a necessidade de inclusão de 100 ml de água e 50 ml de aditivo plastificante para ajustar a consistência e garantir uma mistura homogênea do concreto convencional (b). Deste modo as mesmas modificações foram aplicadas às demais misturas do concreto com substituição de 5% de cinzas (c), concreto com substituição de 10% de cinzas (d), concreto com 20% de substituição de cinzas (e), detalhadas na Figura 10.

Figura 10 - (a) Homogeneização do concreto na betoneira, (b) Massa homogenia do concreto convencional, (c) Massa homogenia do concreto com 5% de cinzas, (d) Massa homogenia do concreto com 10% de cinzas, (e) Massa homogenia do concreto com 20% de cinzas



Fonte: Autoria Própria

Para o enforme dos corpos de foi seguido a norma ABNT NBR 5738/2015, utilizando as fôrmas de ferro com diâmetro de 100 mm, com o auxílio da haste de aço cilíndrica com superfície lisa com as duas extremidades esféricas, foram realizadas duas camadas com 12 golpes para o adensamento manual em cada camada, identificadas na Figura 11.

Figura 11 - Adensamento manual do concreto



Fonte: Autoria Própria

Após o processo de adensamento dos corpos de prova, foram identificados com nomenclatura na parte superior dos corpos para que não sejam misturados com os demais conforme indicados na Figura 12 os corpos convencionais e 5% de cinzas (a) e corpos com 10% e 20% (b).

Figura 12 - (a) Identificação dos corpos de prova concreto convencional e concreto com 5% de cinza, (b) Identificação dos corpos de prova concreto com 10% e concreto com 20% de cinzas



Fonte: Autoria Própria

PROCESSO DE CURA

O processo de cura do concreto é uma das partes mais importantes para o ganho de resistência, segundo a normativa ABNT NBR 5738/2015 no item 8.1.1 da norma em vigor, “Após a moldagem, colocar os corpos de prova sobre uma superfície rígida, livre de vibrações e de qualquer ação que possa perturbar o concreto”. Prosseguindo, a norma ainda afirma que o processo de cura inicial para o corpo de prova cilíndrico deve ser de 24 horas armazenado em local protegido de intemperes, sendo devidamente cobertos com material no reativo e não absorvente com finalidade de evitar a perda de água do concreto.

Desta forma após a realização da identificação, os corpos de prova de concreto convencional e 5% de cinzas (a) e os corpos de prova concreto com 10% e 20% de

cinzas (b), passaram pelo processo de cura coberto com um saco plástico preto para manter a umidade presente na concretagem, o que também contribuiu para a não exposição de luz que poderia gerar calor e comprometer os resultados identificados na Figura 13.

Figura 13 - (a) Cobrimento dos corpos de prova concreto convencional e 5% de cinzas para manter a umidade, (b) Cobrimento dos corpos de prova concreto com 10% e 20% de cinzas para manter a umidade



Fonte: Autoria própria

Após o processo de cura inicial, os corpos de prova foram desinformados após 3 dias devido à impossibilidade de utilização do laboratório durante os finais de semana. De acordo com a norma ABNT NBR 5738/2015, no item 8.2 da norma em vigor, “especifica que os corpos de prova devem ser ensaiados para comprovar a qualidade e a uniformidade do concreto durante a construção”, o item 8.2.3 da mesma norma estabelece que,

Após a identificação, os corpos de prova devem ser armazenados até o momento do ensaio em solução saturada de hidróxido de cálcio ou em câmara úmida, mantendo-se a uma temperatura de $(23 \pm 2) ^\circ\text{C}$ e com umidade relativa do ar superior a 95%. (Norma ABNT NBR 5738/2015).

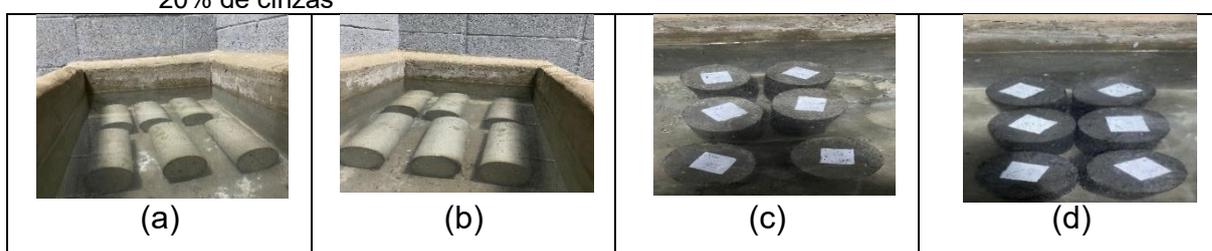
Em conformidade ainda com o item 8.2.3 da norma em vigor ABNT NBR 5738/2015, “os corpos de provas não podem ficar expostos a gotejamentos nem à ação da água em movimento, e deve ser evitado o empilhamento dos corpos.”

Após o desenforme os corpos de provas foram submetidos ao processo de cura final como identificados na Figura 14. Os corpos de prova de concreto convencional (a), aqueles com substituição de 5% de cinzas (b), com 10% de cinzas (c) e com 20% de cinzas (d), foram submersos em um tanque de água com temperatura média variando entre 10 e 18 $^\circ\text{C}$. Essa submersão foi mantida até 24 horas antes da realização do ensaio de ruptura. Houve uma variação no tempo de submersão para

os diferentes períodos de ruptura: os corpos de prova com 7 dias de idade ficaram submersos por uma margem de 2 dias, enquanto os corpos de prova com 28 dias de idade foram submersos por uma margem de 23 dias.

Esse processo é utilizado para manter a hidratação evitando a sua dilatação, nas obras acontecem diferente após a concretagem os pedreiros umedecem as lajes, paredes, calçadas etc., diariamente para evitar trincas de dilatação.

Figura 14 - (a) Submersão em água dos corpos de prova concreto convencional, (b) Submersão em água dos corpos de prova concreto com 5%, (c) Submersão em água dos corpos de prova concreto com 10% de cinzas, (d) Submersão em água dos corpos de prova concreto com 20% de cinzas



Fonte: Aatoria própria

RESULTADOS E DISCUSSÕES

Para os resultados, foram analisados o concreto convencional e os concretos com diferentes porcentagens de cinza de cana-de-açúcar, com o objetivo de avaliar a trabalhabilidade, por meio do Slump Test, e a resistência, através do ensaio de compressão axial. O intuito foi compreender o comportamento das cinzas quando utilizadas como substituto parcial do cimento, buscando uma alternativa econômica e sustentável de substituição do material pozolânico, visando à redução da alta emissão de dióxido de carbono (CO_2) gerado pela fabricação do cimento, sem comprometer a resistência e a qualidade do concreto.

SLUMP TEST

O Slump Test, ou teste de abatimento, é um método rápido e eficaz para verificar a trabalhabilidade do concreto fresco momentos antes de sua aplicação. Esse teste faz parte do controle técnico conforme definido por JACP (2020). A ABNT especifica o procedimento do teste na normativas vigentes NBR NM 67/1996 e a NBR 10342/2012.

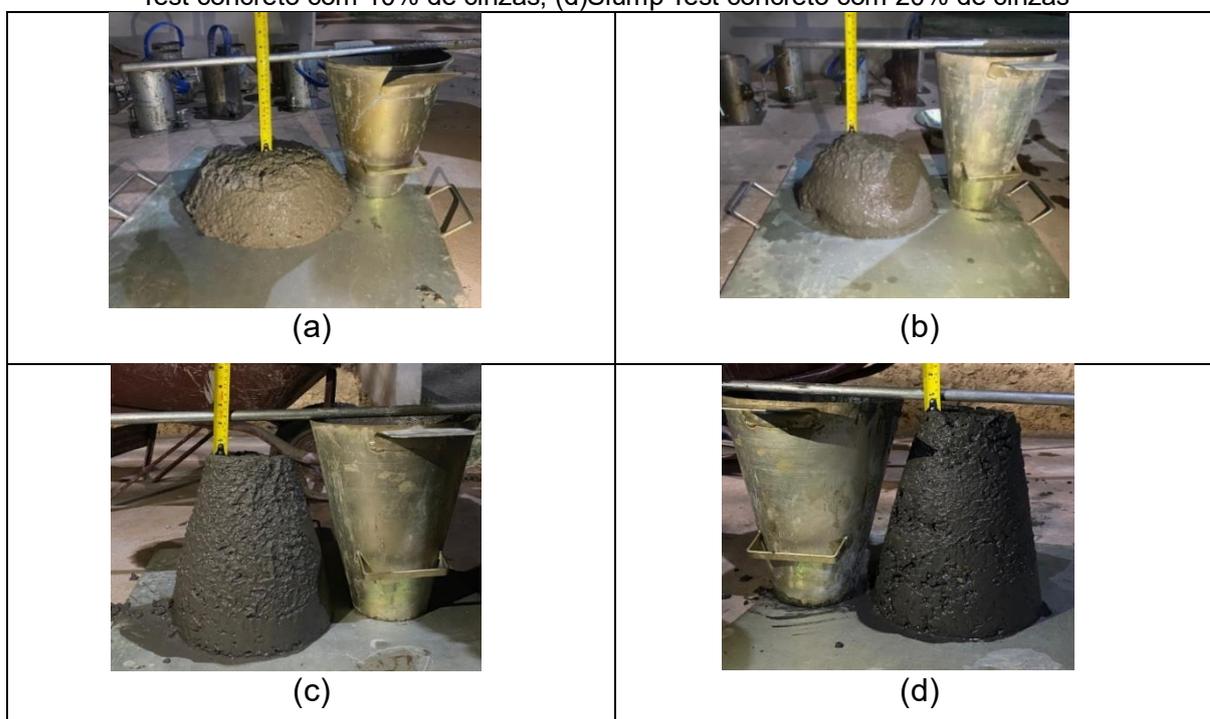
Dessa forma, por meio deste processo, foi possível verificar que tanto o concreto convencional (a), quanto o concreto com adição de 5% de cinza da cana-de-

açúcar (b), apresentaram uma consistência mais fluída, evidenciando a presença de água.

Em contrapartida, ao analisar o processo para o concreto com adições de 10% de cinzas (c), e de 20% de cinza de cana-de-açúcar (d), constatou-se que a consistência do concreto se tornou mais densa. Este resultado sugere uma insuficiência de água.

Conseqüentemente, à medida que o percentual de cinza de cana-de-açúcar é aumentado, observou-se uma redução acentuada no abatimento do concreto, medido pela diferença entre o ponto mais alto da massa e a haste. Conforme ilustrado na Figura 15, o abatimento registrado foi de 17,5 cm para o concreto convencional (a), 15,30 cm para o concreto com adição de 5% de cinza de cana-de-açúcar (b), 5 cm para o concreto com adição de 10% de cinza de cana-de-açúcar (c), e 1,5 cm para o concreto com adição de 20% de cinza de cana-de-açúcar (d).

Figura 15- (a) Slump Test concreto convencional, (b) Slump Test concreto com 5% de cinzas, (c) Slump Test concreto com 10% de cinzas, (d) Slump Test concreto com 20% de cinzas

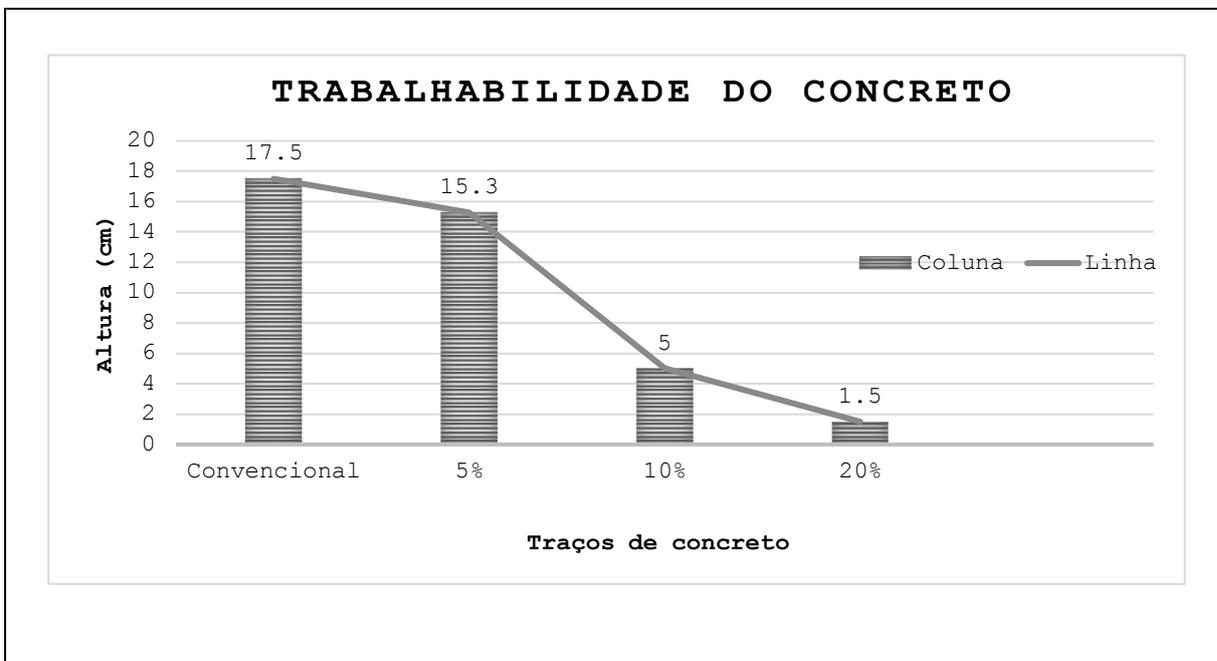


Fonte: Autoria própria

Dessa forma, a trabalhabilidade dos concretos convencionais e dos concretos com diferentes porcentagens de substituições por cinzas de cana-de-açúcar pode ser apresentada graficamente por meio do Slump Test. O gráfico, ilustrado na Figura 16,

demonstra de maneira clara a variação da trabalhabilidade entre as diferentes composições do concreto.

Figura 16 - Gráfico de trabalhabilidade do concreto



Fonte: Autoria própria.

ENSAIO DE COMPRESSÃO AXIAL

O ensaio de compressão foi realizado conforme a norma ABNT NBR 5739/2018, que estabelece o método para determinação da resistência à compressão de corpos de prova cilíndricos, moldados de acordo com a ABNT NBR 5738/2015. Os corpos de prova foram rompidos nas idades especificadas, com tolerância de 7 e 28 dias, conforme ilustrado na Figura 17. Devido à indisponibilidade de cinzas, não foi possível realizar ensaios adicionais em outras idades. A escolha da concretagem dos corpos de prova de 7 dias e 28 dias descrita no decorrer do trabalho, foi feita de forma estratégica, a fim de permitir uma comparação precisa no traçado do gráfico.

Figura 17 - Tabela de tolerância para a idade de ensaio

Tabela 1 – Tolerância para a idade de ensaio	
Idade de ensaio	Tolerância permitida h
24 h	0,5
3 d	2
7 d	6
28 d	24
63 d	36
91 d	48

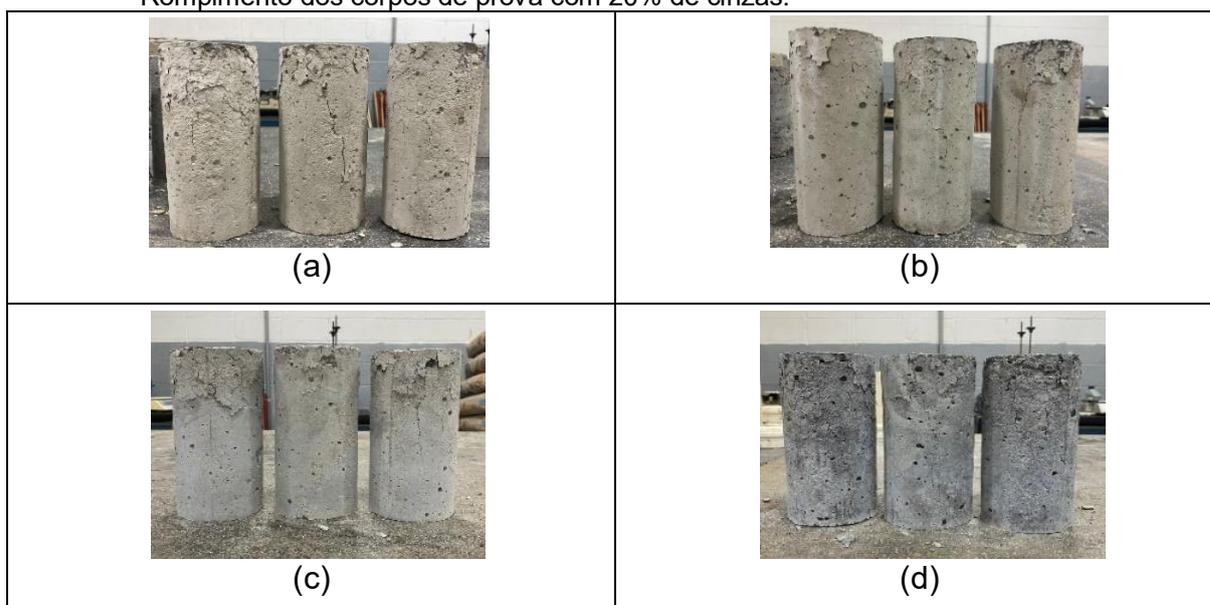
NOTA Para outras idades de ensaio, a tolerância deve ser obtida por interpolação.

Fonte: ABNT NBR 5738/2015. Acesso em 12 de set. 2024.

ENSAIOS DE RESISTÊNCIAS A COMPRESSÃO CONCRETO COM 7 DIAS.

Para a realização dos ensaios de compressão dos corpos de prova com idade de 7 dias, foi utilizada a prensa manual disponível no laboratório de construção civil da Faculdade UNIFIO. Esta prensa, que fornece o valor da força em toneladas-força, exigiu a conversão desse valor para mega pascais (MPa), desta forma a pressão é dada pela fórmula exposta na equação 4. Os ensaios foram realizados nos corpos de prova do concreto convencional (a), do concreto com 5% (b), do concreto com 10% (c) e do concreto com 20% de cinzas (d), obtendo-se as respectivas rupturas exposta na Figura 18.

Figura 18 - (a) Rompimento dos corpos de prova convencional, (b) Rompimento dos corpos de prova com 5% de cinzas, (c) Rompimento dos corpos de prova com 10% de cinzas, (d) Rompimento dos corpos de prova com 20% de cinzas.



Fonte: Autoria própria

Assim, conforme representado no Quadro 2, são exibidos a resistência característica individual à compressão, a resistência característica média à compressão e o desvio padrão dos corpos de prova ensaiados com 7 dias de idade.

Quadro 2 - Resistência a compressão do concreto com 28 dias de idade

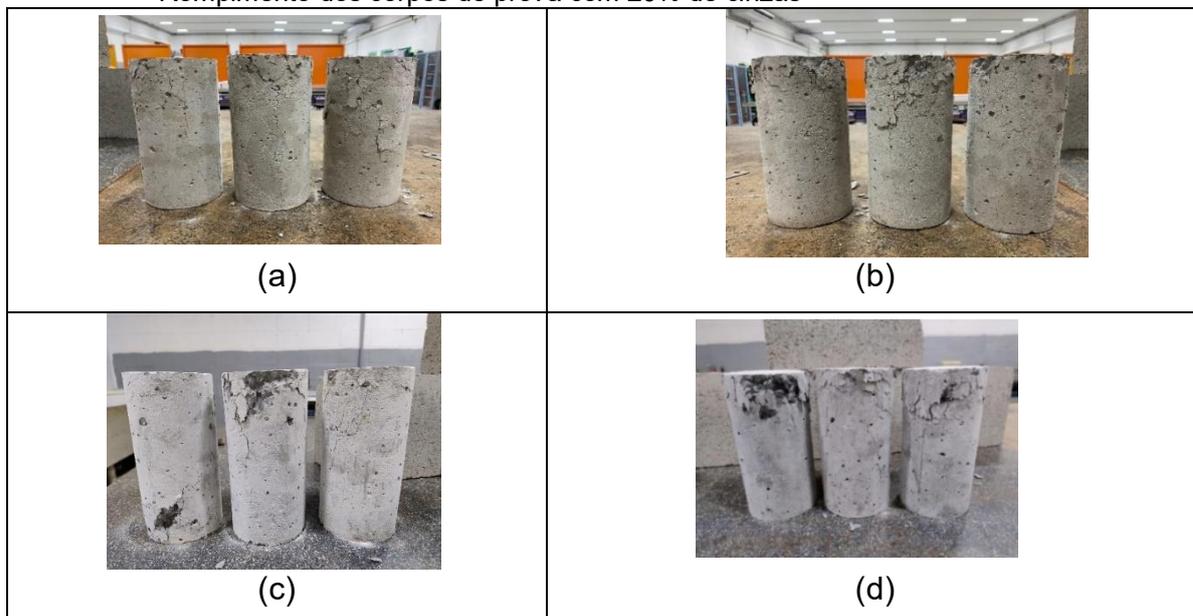
TIPO DE CONC.	CORPO DE PROVA (uni)	RESIST. IND. FCK (MPa)	FORÇA DE RUP. (N)	RESIST MÉDIA FCKM (MPa)	RESIST. MÉDIA FCKM (Nk/m ²)	COEF. VARIAÇÃO (δ)	FCK ₇ (MPa)
Sem substituição de cinzas	1	9,79	76.812,30	9,72	9.718,36	0,0329	9,19
	2	9,30	72.986,40				
	3	10,07	79.068,60				
Com 5% de substituição de cinzas	1	10,32	81.030,60	10,58	10.580,64	0,0198	10,24
	2	10,83	85.052,70				
	3	10,58	83.090,70				
Com 10% de substituição de cinzas	1	9,32	73.182,60	9,56	9.560,06	0,0659	8,52
	2	10,42	81.415,40				
	3	8,94	70.141,50				
Com 20% de substituição de cinzas	1	5,50	43.164,00	5,65	5.648,56	0,0248	5,42
	2	5,84	45.812,70				
	3	5,61	44.046,90				

Fonte: Autoria Própria

ENSAIOS DE RESISTÊNCIAS A COMPRESSÃO CONCRETO COM 28 DIAS

Para a realização dos ensaios de compressão dos corpos de prova com idade de 28 dias, foi utilizada a prensa manual disponível no laboratório de construção civil da Faculdade UNIFIO. Os cálculos foram realizados conforme detalhado no ensaio de compressão com 7 dias, empregando as mesmas conversões descritas. Os ensaios foram realizados nos corpos de prova do concreto convencional (a), do concreto com 5% (b), do concreto com 10% (c) e do concreto com 20% de cinzas (d), obtendo-se as respectivas rupturas exposta na Figura 19.

Figura 19 - (a) Rompimento dos corpos de prova convencional, (b) Rompimento dos corpos de prova com 5% de cinzas, (c) Rompimento dos corpos de prova com 10% de cinzas, (d) Rompimento dos corpos de prova com 20% de cinzas



Fonte: Autoria própria

O Quadro 3 apresenta a representação da resistência característica individual à compressão, da resistência característica média à compressão e do desvio padrão entre os corpos de prova ensaiados com 28 dias de idade.

Quadro 3 - Resistência a compressão do concreto com 28 dias de idade

TIPO DE CONC.	CORPO DE PROVA (uni)	RESIST. IND. FCK (MPa)	FORÇA DE RUP. (N)	RESIST. MÉDIA FCKM (MPa)	RESIST. MÉDIA FCKM (Nk/m ²)	COEF. VARIAÇÃO (δ)	FCK ₂₈ (MPa)
Sem substituição de cinzas	1	14,85	14846,22	15,35	15346,09	0,0254	14,70
	2	15,40	15396,08				
	3	15,80	15795,97				
Com 5% de substituição de cimento por cinzas	1	14,91	14908,70	14,96	14962,85	0,0427	13,91
	2	15,77	15770,98				
	3	14,21	14208,88				
Com 10% de substituição de cimento por cinzas	1	14,76	14758,74	13,15	13150,82	0,0881	11,24
	2	12,62	12621,78				
	3	12,07	12071,92				
Com 20% de substituição de cimento por cinzas	1	9,49	9485,08	9,52	9518,41	0,0344	8,98
	2	9,93	9934,97				
	3	9,14	9135,17				

Fonte: Autoria Própria

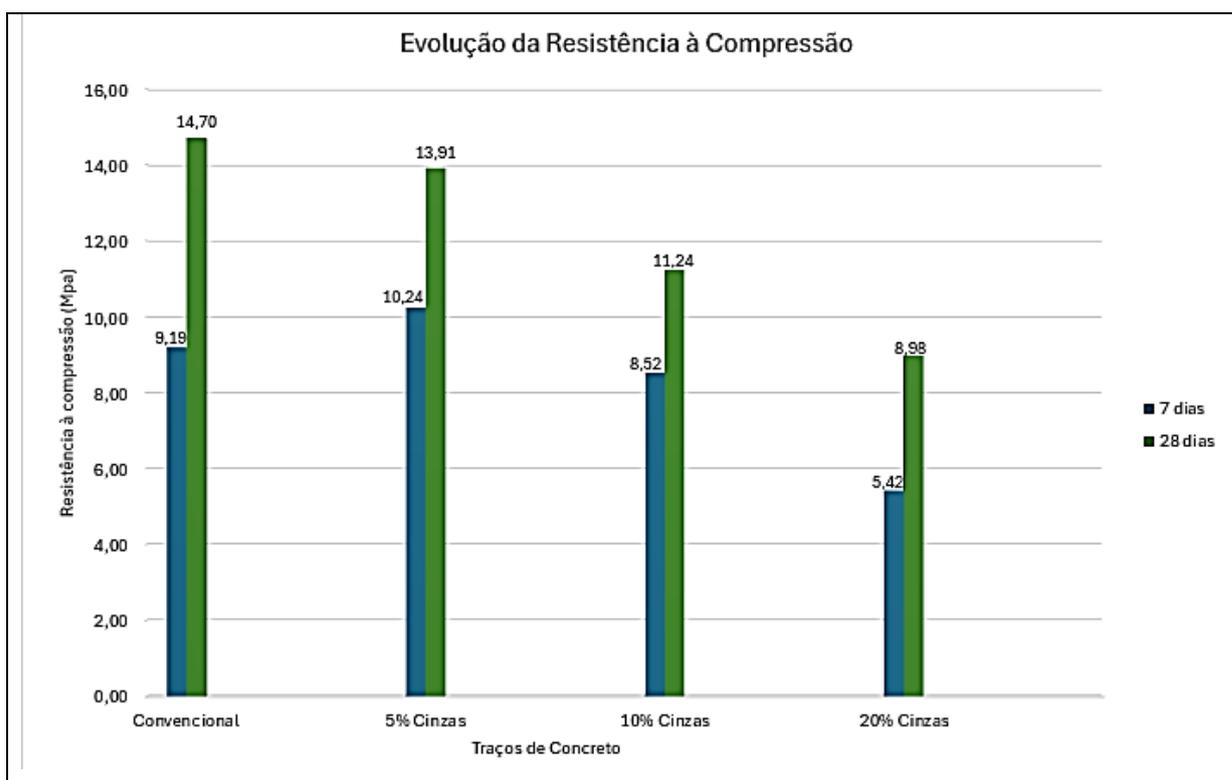
COMPARATIVOS DE RESISTÊNCIA A COMPRESSÃO

Com base nos dados e cálculos obtidos, apresentados nas Tabelas 2 e 3, é possível comparar a resistência característica do concreto à compressão, $FCK_{J_{dias}}$, ajustada através do desvio padrão (Sd) pelo método ABCP. Para o concreto com idade de 7 dias observa-se uma diferença significativa na resistência à compressão entre as diferentes composições do concreto, para traço convencional registrou $FCK_7 = 9,19 MPa$, para o traço com adição de 5% de cinzas de cana-de-açúcar apresentou o melhor desempenho com uma resistência característica de $FCK_7 = 10,24 MPa$ superando os demais traços, o traço com 10% de cinzas demonstrou menor resistência, com $FCK_7 = 8,53 MPa$, enquanto o traço com a maior proporção de cinzas, 20%, apresentou uma resistência drasticamente inferior, com $FCK_7 = 5,42 MPa$, quase metade da resistência do concreto com 5% de cinzas de cana-de-açúcar.

Aos 28 dias de idade o concreto convencional se sobressaiu com $FCK_{28} = 14,70 MPa$ ultrapassando o traço de 5% de cinzas com $FCK_{28} = 13,91 MPa$ que aos 7 dias de idade se mostrou mais resistente que todos os demais, advindo o traço de 10% com $FCK_{28} = 11,24 MPa$ e novamente o concreto de 20% com menor resistência apresentando um $FCK_{28} = 8,98 MPa$.

Dessa maneira, pode-se representar graficamente a resistência característica à compressão dos corpos de prova com diferentes adições de cinzas de cana-de-açúcar. O gráfico de barras a apresentado na figura 20, ilustra de forma clara a variação na resistência do concreto após 7 e 28 dias para cada tipo de mistura.

Figura 20 - Gráfico da resistência a compressão com 07 e 28 dias de idade



Fonte: Autoria Própria

Esses resultados indicam que a adição de cinzas de cana-de-açúcar influencia significativamente a resistência inicial do concreto, sendo que uma proporção de 5% das cinzas, oferece um melhor desempenho em comparação com as outras dosagens, representando uma opção econômica e sustentável na produção do cimento.

CONCLUSÕES

As análises realizadas neste estudo demonstraram que a substituição de 5% de cinza da cana-de-açúcar obteve no período de 7 dias maior resistência a compressão comparado ao concreto convencional. Entretanto, no período de 28 dias ficou demonstrado que o concreto convencional apresentou maior resistência a compressão, porém a redução mínima atingida no concreto com a substituição de 5% de cana-de-açúcar ainda é considerada viável.

Vale salientar que a substituição com 10% e 20 % de cinza da cana-de-açúcar não atingiram os resultados esperados nos mesmos períodos, evidenciando uma diminuição gradativa na resistência, devido a insuficiência de água na mistura.

Assim sendo, reajustar o método de dosagem ABCP, pode ser uma possibilidade de garantir que o concreto tenha maior desempenho aprimorado com a substituição do cimento pelas cinzas de cana-de-açúcar alcançando uma resistência a compressão relativamente satisfatória, ao mesmo tempo que se beneficia dos aspectos ambientais positivos relacionados a essa substituição.

A utilização da cinza de cana-de-açúcar mostrou ser uma opção viável quando aplicada de maneira adequada, oferecendo um bom desempenho a compressão em comparação ao concreto convencional. Essa prática apresenta uma oportunidade significativa para promover a economia e a eficácia da construção sustentável.

REFERÊNCIAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE CIMENTO PORTLAND. **Dosagem do Concreto pelo Método ABCP**. Palestrante: Eng. Rubens Curti. 22 de jul. 2020. Disponível em: <<https://abcp.org.br/>>. Acesso em 10 set. 2020.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT NBR 5738. **Concreto: Procedimento para moldagem e cura dos corpos de prova**. Rio de Janeiro 2015.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT. NBR 11578: **Cimento Portland composto**. Rio de Janeiro, 1991.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT. NBR 12655: **Concreto de cimento Portland – Preparo, controle, recebimento e aceitação – Procedimento**. Rio de Janeiro, 2022.

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

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT. NBR 16889 – **Determinação da consistência pelo abatimento do tronco de cone**. Rio de Janeiro, 2020.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT. NBR 5732: **Cimento Portland comum**. Rio de Janeiro, 1991.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT. NBR 5739: **Ensaio de compressão de corpos de provas cilíndricos**. Rio de Janeiro 2018.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT. NBR 7211. **Agregados para concreto – Especificação**. Rio de Janeiro, 2022.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS- ABNT. NBR 10342. **Perda de abatimento – Método de ensaio**. Rio de Janeiro, 2012.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS/ MERCOSUL – ABNT. NBR. NM 67. Concreto - Determinação da consistência pelo abatimento do tronco do cone. Rio de Janeiro, 1996.

BORGES, F. M; CARREIRO, T. T. **Métodos de dosagem usuais dos principais tipos de concreto: uma revisão teórica**. Palhoça. Universidade do Sul de Santa Catarina, 2017. Dissertação do Curso de Engenharia Civil, 64 p.

CARDOSO, C; SILVA, F; PENA, J; MARTINS, V. **Substituição parcial do cimento por cinzas de bagaço de cana de açúcar em concreto**. Belo Horizonte. Centro Universitário de Belo Horizonte, 2023. Dissertação do Curso Engenharia Civil. 19 p.

CONAB. COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO. **Acompanhamento da safra brasileira – Cana de açúcar**. Primeiro Levantamento. Safra 2017/2018. Brasília, p 57. Monitoramento Agrícola Cana de Açúcar, abril 2017. Disponível em: <<https://www.canab.gov.br>>. Acesso em 13 de mar. 2024.

DE PAULA, M. O; TINÔCO, I. F. F; RODRIGUES, C. S, DA SILVA, E. N; SOUZA; C. F. **Potencial da cinza do bagaço da cana-de-açúcar como material de substituição parcial de cimento Portland**. Campinas Grande/ PB. Revista AGRIAMBI (Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental), volume 13, nº 3, p 353-357, out, 2008. Disponível em: <<https://www.scielo.br/j/rbeaa/a/34KLycZYPyhR3qSYgyqJcDy/?format=pdf&lang=pt>>. Acesso em 16 de mai. 2024.

JACP, Produtos Para Construção Civil: **O que é Slump do concreto e como fazer?** JACP, 2020. Disponível: <https://jacp.com.br/2020/05/07/o-que-e-slump-do-concreto-e-como-fazer-o-teste/>. Acesso em 16 de mai. 2024

NASCIMENTO, Fernanda Wanderley Correa. **Análise de viabilidade entre concreto dosado pelos métodos da ABCP/ACI e IPT/USP**. Universidade Federal de Pernambuco, 2018. Dissertação do Curso de Engenharia Civil, 17 p.

SAMPAIO, Z. L.M; SOUZA, P. A. B. F; GOUVEIA, B. G. **Análise da influência das cinzas do bagaço de cana-de-açúcar no comportamento mecânico de concretos**. Natal/RN. Revista IBRACON de Estruturas e Madeiras, volume 7, nº 4, p 626 – 647, agosto, 2014. Disponível em:<<https://doi.org/10.1590/S1983-41952014000400006>>. Acesso em 16 de mai. 2024.

VIEIRA, A. A. P. **Estudo do aproveitamento de resíduos de cerâmica como substituição pozolânica em argamassa e concretos**. João Pessoa. Universidade Federal da Paraíba, 2005. Tese de Mestrado do Curso de Pós- Graduação em Engenharia Urbana. 127 p.

VITAL, Andréia. **Usina São Luiz comemora 70 anos com recorde de produção**. Jornal Cana, 2022. Disponível em: <<https://jornalcana.com.br/usina-sao-luiz-comemora-70-anos-com-recorde-de-producao/>>. Acesso em: 13 de mar. 2024.

WERLE, Roger André. **Correlação do método de dosagem ABCP, para concreto convencionais, com materiais encontrados na região do vale do Taquari/RS**. Lajeado. Centro Universitário Univates, 2016. Dissertação do Curso de Engenharia Civil. 67 p.