

AValiação da Viabilidade Técnica de uma Cinza do Bagaço da Cana-de-açúcar, Beneficiada por Moagem, para Produção de Concretos.

EVALUATION OF THE TECHNICAL FEASIBILITY OF A SUGARCANE BAGASSE ASH, BENEFITED BY MILLING, FOR CONCRETE PRODUCTION.

Gabriel Moreira Santos Silva¹
Simone Perruci Galvão²

RESUMO

O Brasil é um dos países com maior produção de açúcar e etanol no mundo produzindo, como resíduo, a cinza do bagaço de cana-de-açúcar (CBCA). Com o objetivo de reduzir os impactos ambientais gerados por esta indústria e contribuir para a valorização da CBCA, este estudo avaliou a viabilidade técnica do emprego da CBCA, em adição ao cimento Portland, para produção de concretos pré-moldados. A cinza coletada na indústria foi beneficiada por moagem a seco, em moinho de bolas, visando otimizar o tempo de processamento para uma faixa de finura de 1600 m²/kg. O tempo de processamento foi melhorado para as primeiras sete horas, chegando a finura Blaine de 1400 m²/kg, renomeando a mostra para CB-1400 e prosseguindo-se com os demais ensaios de caracterização do material quanto a pozzolanicidade das cinzas e as propriedades do concreto: Abatimento, resistência à compressão simples e absorção de água. Para efeito comparativo foram produzidos concretos sem cinza (REF), com cinza “in natura” sem moagem (CB-SM) e com cinza beneficiada (CB-1400) e realizado dois tipos de cura (cura úmida e cura ao ar). Os resultados indicaram que apenas a CB-1400 tem possível potencial pozzolânico e efeito fíler. Na avaliação dos concretos, no estado fresco, apenas a mistura com a CB-1400 manteve o abatimento de referência. Quanto as propriedades do concreto no estado endurecido, observou-se que o processo de cura ao ar, praticado na indústria, não influenciou significativamente nas resistências aos 7 dias e aos 28 dias; já na condição de cura úmida, o concreto CB-1400 apresentou resistência à compressão simples maior que o traço de referência. Quanto a capacidade de absorção de água, todos os concretos ficaram dentro da tolerância designada pela NBR 8451-1 (2020). A CBCA beneficiada com a moagem seguida do acompanhamento da finura das partículas mostrou-se uma alternativa viável para produção do concreto, podendo contribuir para a redução dos impactos ambientais desta agroindústria e gerar valor econômico ao material.

Palavras-chave: Cinza do bagaço da cana-de-açúcar, Concreto pré-moldado, Pozzolana, Efeito fíler.

ABSTRACT

Brazil, the largest sugar and ethanol producer in the world, has a large supply of sugarcane bagasse ash (SCBA) as waste from the agro-industry. Intending to reduce the environmental impact caused by this industry and contribute to the valorization of SCBA, this study investigated the technical feasibility of using SCBA in addition to Portland cement for the production of precast concrete elements. The ash collected from the industry was processed by dry grinding in a ball mill, optimizing the processing time for a fineness range of 1600 m²/kg. The processing time was improved for the first seven hours, reaching a Blaine fineness of 1400 m²/kg, renaming the sample to CB-1400, and proceeding with further characterization tests of the material regarding the pozzolanic properties of the ashes and the properties of concrete, such as slump, compressive strength, and water absorption. For comparison, concrete without ash (REF), with ash “in natura” without grinding (CB-SM) and with favored ash (CB-1400) were produced and two types of curing (wet curing and air curing) were performed. The results indicated that only the CB-1400 has possible pozzolanic potential and filler effect. In the evaluation of the concrete, in the fresh state, only the mixture with CB-1400 maintained the slump of reference. As for

¹ Bacharelado em Engenharia Civil pela Universidade Federal Rural de Pernambuco – Unidade Acadêmica do Cabo de Santo Agostinho, 2023.

² Doutora em Engenharia de Materiais, UFPE; Professora Adjunta da Unidade Acadêmica do Cabo de Santo Agostinho - UACSA.

the properties of concrete in the hardened state, it was observed that the air curing process, practiced in the industry, did not significantly influence the strengths at 7 days and 28 days; as for the wet curing condition, the concrete CB-1400 showed higher compressive strength than the reference mix. As for water absorption capacity, all concretes were within the tolerance designated by NBR 8451-1 (2020). The SCBA benefited from the grinding followed by monitoring the fineness of the particles proved to be a viable alternative for concrete production and can contribute to reducing the environmental impacts of this agro-industry while generating economic value for the material.

Keywords: Sugar cane bagasse ash, Precast concrete, Pozzolan, Filler effect.

INTRODUÇÃO

A cultura da cana-de-açúcar no Brasil está presente em quase todos os estados, sendo São Paulo responsável por cerca de 52% da produção nacional conforme último boletim da Companhia Nacional de Abastecimento (Conab) da safra 2022/2023, com o bagaço, produzido após a extração do caldo, como principal resíduo.

O estado de Pernambuco, segundo o mesmo Boletim da Conab, apresentou 2,35% da produção de cana no país nesta última safra, representando 14.055.100 toneladas de cana-de-açúcar, do qual baseado nos dados fornecidos por Souza et al (2011) e Paula (2006) são produzidos em média 250 kg de bagaço por tonelada de cana processada, sendo 10% de resíduo de cinza gerado no processo de queima do bagaço. Desta forma, é possível estimar que esta produção de cana correspondeu 3.513.775 toneladas de bagaço e 351.377 toneladas do resíduo de CBCA produzido.

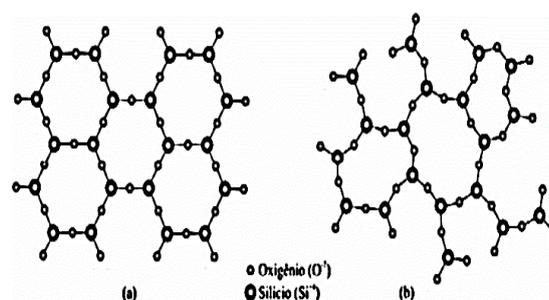
De acordo com Martins (2009), após a colheita, a cana é levada para a fase de lavagem e primeira moagem para produção de açúcar, seguida pela produção de Etanol e a geração de bagaço. O bagaço é composto em média por 46% de fibras, 50% de água e 4% de outros sólidos dissolvidos, e é utilizado como combustível nas caldeiras para gerar energia elétrica através do vapor produzido, resultando em cinzas de bagaço da cana-de-açúcar (CBCA) como resíduo.

Cordeiro (2006) relata que a CBCA, resultante da combustão nas caldeiras, é composta principalmente de dióxido de silício (SiO_2), normalmente

acima de 60%, na forma de sílica cristalina ou amorfa.

Conforme Searle e Grimshaw (1923), a sílica na forma cristalina, quimicamente menos reativa, tem uma estrutura regular (Figura 1.a), enquanto a sílica amorfa (Figura 1.b), mais reativa, é metaestável e pode mudar lentamente para a forma cristalina em temperaturas acima de 700°C , se recristalizando totalmente em torno de 1250°C .

Figura 1. Estrutura plana da sílica cristalina (a), formada por átomos orientados à longa distância, e sílica amorfa (b).



Fonte: Van Vlack, 1984 apud Cordeiro, 2006.

Conforme Tisdale et al (1985, apud DEMATTÊ et al, 2011), o silício é o mineral mais absorvido pela cana-de-açúcar, concentrando-se nos tecidos de suporte do caule e na folha. Segundo Barbosa Filho e Prabhu (2002), na fase de lavoura, o silício é absorvido pelas raízes na forma de ácido monossilícico, transportado para as folhas e depositado na parede externa das células da epiderme como sílica gel, formando uma barreira mecânica contra fungos patógenos e reduzindo as perdas de água por transpiração.

Conforme Gomes, Furtado e

Souza (2018), a sílica gel é produzida em organismos vivos e está presente na casca de vegetais, como a cana-de-açúcar. Outra possível origem da sílica ocorre pela presença de areia (quartzo) proveniente do solo da área de plantação.

A composição da CBCA, ainda segundo Cordeiro(2006) também inclui baixas proporções de outros óxidos, como óxido de alumínio (Al_2O_3), óxido de potássio (K_2O), óxido de ferro (Fe_2O_3) e óxido de cálcio (CaO). No entanto, Fernandes Filho (2012) destaca que a composição da cinza do bagaço da cana-de-açúcar pode variar dependendo de fatores como o tipo de cana-de-açúcar, o processo de produção e a temperatura de combustão nas caldeiras.

A utilização de resíduos industriais, como a CBCA, tem sido explorados como alternativa na indústria da construção civil como adições minerais, especialmente na produção de concretos e argamassas. Inicialmente, são selecionados resíduos que possam ser incorporados a matrizes cimentícias tanto como aglomerantes quanto como agregados.

A reutilização desses materiais proporciona um destino adequado para o mesmo, contribuindo positivamente tanto para o meio ambiente quanto para a economia, além de ajudar no desenvolvimento das propriedades do material final aos quais são incorporados.

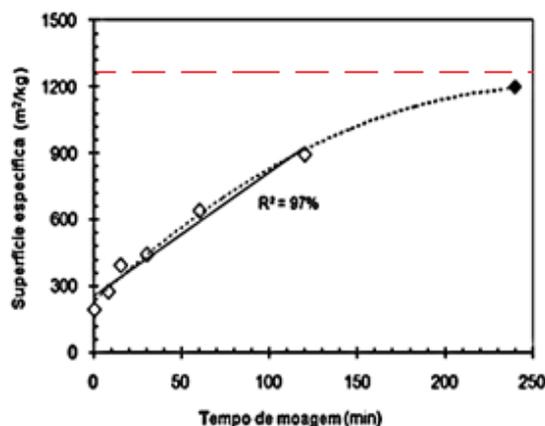
De acordo com Tutikian, Isaia e Helene (2011), as adições minerais pozolânicas podem ser utilizadas na construção civil para produção de concretos e argamassas, adicionando-a ou substituindo parcialmente o cimento, exercendo suas contribuições de reatividade por ação química e/ou física. A adição mineral também pode dar-se pela substituição parcial de parte dos agregados.

A CBCA, a depender das condições de como foi produzida e também da sua granulometria, pode apresentar estrutura amorfa e reativa, podendo ser considerada uma adição mineral pozolânica.

Estudos com a substituição parcial do cimento Portland pela CBCA (ÁVILA; FERNANDES; AKASAKI, 2016; HOJO; MARTINS, 2015; MELLO et al, 2020) ou até mesmo como agregado miúdo (BESSA, 2011; CASTRO e MARTINS, 2016; BRAGA et al, 2017; LOPES; RUDNICK; MARTINS, 2018), tem sido evidenciados, muitos deles com resultados positivos e mostrando que resíduos da agroindústria poderão trazer novas perspectivas tecnológicas na construção civil, inclusive ajudar na redução da emissão de gases que causam efeito estufa.

Outros trabalhos também apontam para o beneficiamento do material para desenvolver sua reatividade. O beneficiamento por cominuição das partículas das cinzas – aumentando a superfície específica – propiciam ao aumento da superfície reativa (CORDEIRO; TOLEDO FILHO; FAIRBAIRN, 2010; TORRES, 2019), muito embora, conforme Cordeiro, Toledo Filho e Fairbairn (2010), o tempo deste beneficiamento é um fator a ser analisado, pois após um período de moagem existe a diminuição da taxa de aumento da superfície específica em virtude da aglomeração das partículas (Figura 2).

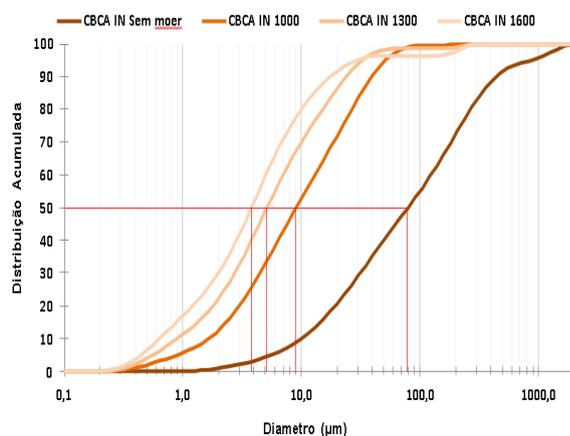
Figura 2. Relação entre o tempo de moagem e a superfície específica do resíduo de cinza do bagaço da cana-de-açúcar.



Fonte: Adaptado de Cordeiro, Toledo Filho e Fairbairn, 2010.

Torres (2019) coletou uma CBCA in natura, da Usina Petribú, e obteve um potencial pozolânico do material através de ensaios determinados pelas NBR 5751 e NBR 5752, apenas como beneficiamento de cominuição, sem tratamento térmico. Onde obteve superfície específica da cinza de 1600 m²/kg. A autora usou um moinho de bolas com uma carga de 8:1 (1kg de cinza para 8 kg de bolas – corpos moedores) para moer as amostras até patamares de superfície específica predeterminados de 1000, 1300 e 1600. A única cinza com potencial pozolânico foi a que obteve finura de Blaine 1600, com diâmetro médio das partículas(D₅₀) de aproximadamente 4µm , após 24 horas de ensaio (Figura 3).

Figura 3. Curvas granulométrica da CBCA apenas com beneficiamento de moagem e identificação do D50, em vermelho.



Fonte: Adaptado de Torres, 2019.

De modo geral, ainda conforme Tutikian, Isaia e Helene (2011), várias propriedades do concreto podem ser afetadas positivamente com adições minerais, tanto no estado fresco quanto no endurecido. Fisicamente, pela alta quantidade de finos, é possível ter o aumento da densidade do concreto em função do preenchimento dos poros, com o efeito do empacotamento granulométrico, aumentando sua resistência mecânica e diminuindo sua permeabilidade. Também, quimicamente, a depender do grau de reatividade da cinza, o material pozolânico

reage com o hidróxido de cálcio, resultante da hidratação do cimento Portland, formando cristais de silicato de cálcio hidratado (C-S-H), contribuindo para o aumento da resistência a compressão simples e a diminuição da permeabilidade.

Na produção de concreto, muitos estudos variam em metodologia, mas em geral mostram que substituir entre 10% e 20% do cimento por cinzas é viável e pode melhorar as características do concreto no estado fresco (CORDEIRO; TOLEDO FILHO; FAIRBAIRN, 2010; SESSA, 2013; HUSSEIN et al, 2014; ZAREEI; AMERI; BAHRAMI, 2018) e endurecido (CORDEIRO, 2010; RERKPIBOON, 2015; LE; SHEEN; LAM, 2018; ALI et al, 2021;), sendo também uma opção econômica e ambientalmente sustentável para a indústria da construção civil.

Na pesquisa bibliográfica realizada, verificou-se que apenas o estudo de Andrade Neto et al (2021) abordou a adição de CBCA na produção de concreto, utilizando uma taxa de adição de até 15%. Nesse estudo, foram obtidos resultados que demonstram aumento das resistências à compressão simples, aos 28 dias, após a adição de CBCA.

Diante do que foi apresentado, com o intuito de contribuir para a valorização desta CBCA, o presente trabalho buscou avaliar a viabilidade técnica do emprego da CBCA, em adição ao cimento Portland, apenas com o beneficiamento de moagem, em concretos para estruturas pré-moldadas. No processo foi analisada a atividade pozolânica de uma CBCA com adaptações nos graus de moagem fornecidos a partir dos resultados de Torres(2019), visando otimizar o tempo mínimo deste tipo de beneficiamento. Também foram avaliadas as propriedades de concretos, no estado fresco e endurecido, com e sem a adição de 20% de cinza em relação a um traço de referência.

MATERIAL E MÉTODOS

Programa experimental

Este trabalho avaliou o uso de CBCA na produção de concreto para pré-moldados. Duas amostras de CBCA foram coletadas, uma moída até atingir uma superfície específica de $1600 \pm 50 \text{ m}^2/\text{kg}$ (CB-1600) e outra sem beneficiamento da moagem (CB-SM). Ambas foram avaliadas quanto ao grau de atividade pozolânica e adicionadas em uma proporção de 20%, em relação a massa de cimento, ao traço de um concreto, fornecido por uma empresa de pré-moldados de concreto, tomado como referência.

Os concretos foram submetidos a cura úmida e cura ao ar, neste segundo caso simulando a condição real de produção. A resistência à compressão simples aos 7 dias foi avaliada, levando em consideração que os postes pré-moldados são normalmente instalados a partir deste período, e são curados ao ar – exposto no ambiente da fábrica - e também aos 28 dias, cura úmida, conforme a norma (NBR 5738, 2016) prescreve para as análises da resistência à compressão, para atender as designações de projeto.

Material

A CBCA foi coletada na usina sucroenergética do grupo Petribú, situada no município de Lagoa de Itaenga, no estado de Pernambuco, região da zona da mata de Pernambuco. Esta tem aparência alongada e achatada (Figura 4).

Figura 4. Aspecto da cinza do bagaço da cana-de-açúcar coletada.



Fonte: Autor, 2023.

O bagaço recolhido foi queimado nas caldeiras como fonte de combustível para geração de vapor. A cinza utilizada no presente estudo foi retirada diretamente de uma estrutura abaixo da caldeira, uma espécie de funil que descarta as cinzas em um canal que transporta o material até uma piscina de decantação. Internamente estavam sendo calcinadas sob uma temperatura em torno de 800°C , estando totalmente seca. Foram recolhidas e armazenadas diretamente em recipientes de 18 Litros.

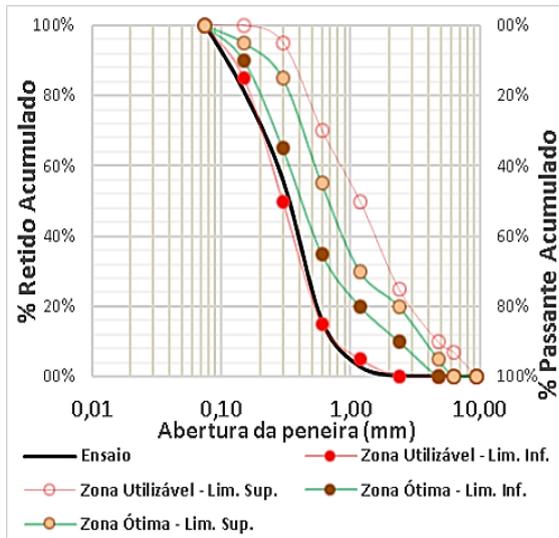
As cinzas coletadas, ambas “in natura”, foram separadas em duas amostras, uma para beneficiamento por moagem e outra sem a moagem, nomeadas como CB-b e CB-SM respectivamente. Esta última foi deixada no moinho de bolas por 2 minutos, utilizando a mesma configuração de bolas, apenas para garantir uma homogeneidade para a execução dos ensaios de caracterização. O “b” da nomenclatura da amostra cominuída representa a superfície específica Blaine final encontrada.

Para a pesquisa foi utilizado o Cimento composto por fíler: CP-II-F-32, da marca Nacional, para execução do ensaio de determinação do índice de desempenho da cinza com o cimento Portland, aos 28 dias, conforme a NBR 5752 (2014) e o CP V ARI, da marca Nacional, para a produção dos concretos.

Foi também utilizado Hidróxido de Cálcio grau P.A (grau de pureza, com teor mínimo de 95%), da Meta Química, para determinação da atividade pozolânica com a cal, aos sete dias de acordo com a NBR 5751 (2015).

Como agregado miúdo foi utilizado uma areia natural quartzosa. Os dados da caracterização da areia na pesquisa estão fornecidos na curva granulométrica (Figura 5) e tabela dos resultados (Tabela 1). É observado que a areia utilizada é bastante fina, apresentando módulo de finura 1,56 e se encaixa no limite inferior da zona utilizável estabelecido pela NBR 7211 (2019), com módulo de finura que de 1,56.

Figura 5. Distribuição granulométrica acumulada da areia.



Fonte: Autor, 2023.

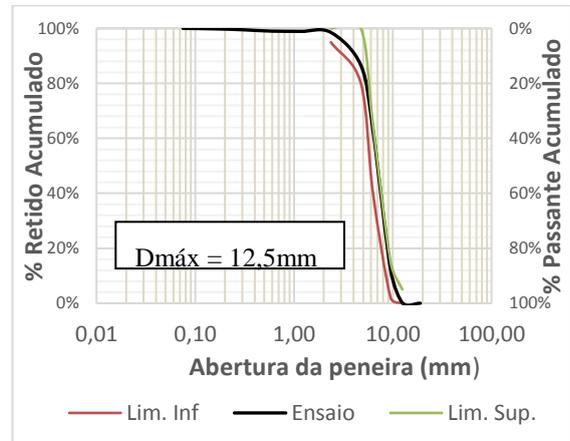
Tabela 1 – Características básicas do agregado miúdo utilizado

Caracterização	Areia
Massa unitária (kg/dm ³)	1,21
Massa específica (kg/dm ³)	2,62
Módulo de Finura	1,56
Diâmetro Máximo (mm)	1,2

Fonte: Autor, 2023.

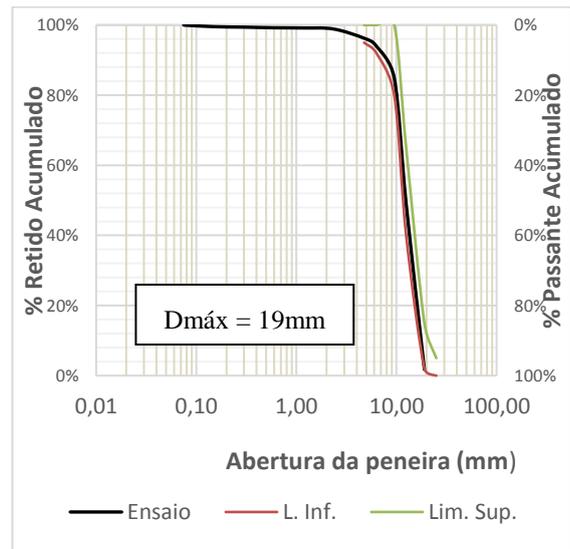
O agregado graúdo utilizado foi uma brita Gnáissica de tamanhos 12,5mm (Figura 6) e 19mm (Figura 7), oriundos da Pedreira Vitória, localizada no município de Vitória de Santo Antão – PE.

Figura 6. Distribuição granulométrica acumulada da brita 12,5mm.



Fonte: Autor, 2023.

Figura 7. Distribuição granulométrica acumulada da brita 19mm.



Fonte: Autor, 2023.

A água utilizada nos ensaios dos concretos foi a própria do abastecimento público da cidade de Feira Nova-PE, já que o concretos foram rodados na empresa de pré-moldados e a água utilizada nos ensaios de pozolanicidade foi a do abastecimento público do Cabo de Santo Agostinho-PE, ambas atendem as especificações quanto a produção de concretos, de acordo com a NBR 15900-1 (2009).

Métodos

Produção e caracterização da CBCA

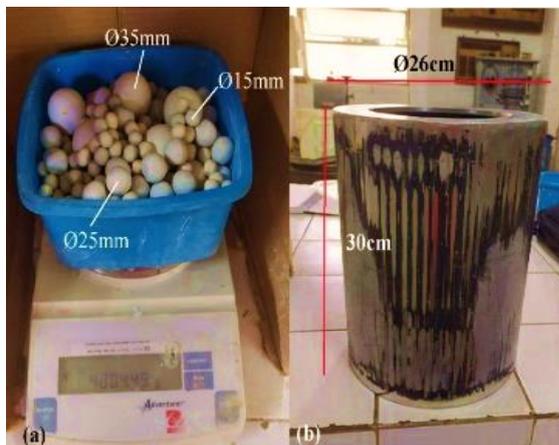
Cominuição da CBCA

A amostra de CBCA submetida ao processo de cominuição foi moída com o objetivo de alcançar uma finura Blaine de 1600 m²/kg, nomeada como CB-1600, analisado através da NBR 16372 (2015).

O processo de moagem foi adaptado a partir dos resultados do estudo de Torres (2019), com o uso de um moinho de bolas do laboratório de Engenharia Civil, da Universidade Federal de Pernambuco. Foi avaliada uma carga maior do que no estudo de Torres (2019) para otimizar o tempo de beneficiamento do processo.

Os corpos moedores, responsáveis pela cominuição da amostra, são esferas de porcelana com três diâmetros médios: 35mm, 20mm e 15mm (Figura 8.a), representando 15%, 25% e 50% da massa total da carga, respectivamente, ocupando um volume aparente de 55% da capacidade líquida do moinho, chegando a um total de 16kg para moer um 1 kg de cinza a uma velocidade de 50 rpm. O moinho utilizado, do tipo rotativo, possui como dimensões 26 cm (diâmetro) e 30 cm (altura) (Figura 8.b), totalizando um volume de 15,928 L.

Figura 8. a). diâmetros dos corpos moedores. b). Dimensões do reservatório do moinho.



Fonte: Autor, 2023.

Massa específica, Superfície específica e Granulometria da CBCA.

Para a caracterização da cinza foram executadas as análises físicas da massa específica pela NBR 16605 (2017), utilizando o frasco volumétrico de Le Chatelier, observado na Figura 9.a e o acompanhamento da superfície específica pelo método de finura Blaine da NBR 16372 (2015), na Figura 9.b.

Figura 9. a)Ensaio de massa específica com frasco volumétrico de Le Chatelier. b)Equipamento para ensaio de superfície específica (Blaine).



Fonte: Autor, 2023

Houve também a caracterização da sua graduação por análise de granulometria a laser, no laboratório do Centro de Tecnologias Estratégicas do Nordeste (CETENE).

Análise da atividade pozolânica da CBCA.

O ensaio de determinação do índice de pozolanicidade da CBCA estudada foi realizado, conforme prescrição da NBR 5751 (2015), avaliando a reatividade da cinza com a cal, aos sete dias. Também foi realizado o ensaio determinado pela NBR 5752 (2014), que avaliou o comportamento da resistência à compressão simples de CPs (corpos de provas) de argamassa, indicando o índice de desempenho do material estudado com cimento Portland, aos 28 dias. A moldagem e o índice de consistências das argamassas,

para ambos os ensaios, seguiram conforme a NBR 7215 (2019).

Para o ensaio de atividade pozolânica das CBCA com a cal (NBR 5751 (2015), argamassas compostas por por areia, hidróxido de cálcio e as cinzas, obtidas nesta pesquisa, foram misturadas com a água de amassamento para uma consistência de 225 ± 5 mm, foram moldadas quatro corpos de prova cilíndricos de 50mm de diâmetro e 100mm de altura, seguidas de um processo de cura durante 7 dias, sendo as primeiras 24h em temperatura ambiente de (23 ± 2) °C e o restante dos dias mantidos em estufa à temperatura de (55 ± 2) °C. A atividade pozolânica das cinzas com a cal foi avaliada a partir do valor médio da resistência à compressão simples.

A Tabela 2 informa a quantidade dos materiais utilizados em cada mistura, calculados em função da massa específica das cinzas, conforme a NBR 5751 (2015). O intervalo de consistência das argamassas de 225 ± 5 mm, obtido no ensaio da mesa de consistência de argamassas, foi mantido constante para todas as misturas, conforme especificado por norma.

Tabela 2 – Quantidade de material, em massa (g) utilizada em cada traço - NBR 5751

	Cinza (g)	Ca(OH) ₂ (g)	Areia (g)	Água (g)
CB-SM	281,81	138,67	1248	388,10
CB-1400	290,82	138,67	1248	298,22

Fonte: Autor, 2023.

O índice de desempenho do material, utilizado neste estudo, com o cimento foi analisado de acordo com a NBR 5752 (2014), na idade 28 dias. Para este ensaio foram preparados CPs de argamassas com cimento, CBCA (25% do material em

substituição do cimento), areia e água, os resultados de resistência à compressão simples foram comparados ao traço de referência, contendo cimento (CP II-F-32), areia e a água de amassamento. Para este ensaio foram moldados quatro CPs, de 50mm de diâmetro e 100mm de altura.

Vale ressaltar que, assim como no ensaio anterior, antes da moldagem dos CPs foi verificado o índice de consistência médio ($IC_{médio}$) dos traços executados, Tabela 3, tomando o correspondente índice da mistura de referência, conforme norma. Para os demais traços foi utilizado aditivo superplastificante para manter o índice de consistência normal ao da argamassa de referência (REF), em ± 10 mm, tornando-se dispensável sua utilização caso o índice de consistência fosse maior que o da argamassa REF.

Tabela 3 – Índices de consistência médios

$(IC_{médio})$				
Amostras	Aditivo (g)	$IC_{médio}$ (mm)	Lim. Sup. (mm)	Lim Inf. (mm)
REF	-	156	146	166
CB-SM	3,12	163	-	-
CB-1400	-	168	-	-

Fonte: Autor: 2023.

Produção e caracterização dos Concretos

Dosagem

O traço de referência (Tabela 4), indicado como REF, foi cedido por uma empresa produtora de postes de concreto armado. A Tabela 4 também apresenta os traços com a adição de 20% das duas amostras de cinzas estudadas.

Tabela 4 – Dosagens básicas dos concretos utilizados no estudo

	C	A	B1	B0	CB	Ag	Ad
0% REF	1	1.71	0.89	1.78	-	0.45	7.5
20% CB SM	1	1.71	0.89	1.78	0.20	0.45	7.5
20% CB 1400	1	1.71	0.89	1.78	0.20	0.45	7.5

Fonte: Autor, 2023.

Conforme a ABNT NBR 6118 (2014), a resistência característica do concreto deve atender a classe de agressividade ambiental, tipo II, mínimo exigido pela NBR 8451-1(2020) para postes de concreto armado. Classificada, como: atmosfera moderada, área urbana e de pequeno risco de deterioração das estruturas.

O concreto deverá ser de no mínimo da classe C25. Todos os materiais do traço (brita, areia e cinza) foram secos em estufa por 24h, na temperatura 105+/-5°C, não havendo necessidade de correções na quantidade de água baseados no teor de umidade. Foram realizados ensaios para os concretos de referência (REF) e com adição de 20% de CBCA, em relação a massa do cimento, para os concretos com CBCA sem moagem (CB-SM) e com moagem (CB-1400).

Moldagem e processos de cura dos concretos.

O processo de moldagem dos CPs de concreto, seguiu a norma NBR 5738(2016), foram produzidos CPs com dimensões de 10 cm de diâmetro por 20 cm de altura. Os CPs foram adensados e armazenados em local livre de interpéries por 24 horas, para a cura inicial. Foram moldados 4 CPs para cada

subgrupo de idade e tipos de cura, exceto para o ensaio de absorção, onde foram moldados o mínimo exigido por norma: de 2 CPs.

Os CPs de cura úmida foram imersos em solução saturada de hidróxido de cálcio a (23 +/- 2)°C, exceto para o subgrupo de cura ao ar, que ficou exposto às condições climáticas típicas dos quais são submetidos os postes pré-moldados (temperatura média de 28°C e umidade relativa do ar em 90%), em uma área próxima (cerca de 35 metros) de um lago que ocupa uma área de 4108 m².

Os corpos de prova submetidos a cura ao ar passaram apenas pelo ensaio de resistência à compressão simples e foram analisados na idade de 7 dias. Já os submetidos a cura úmida foram submetidos ao ensaio de resistência à compressão simples, aos 7 e 28 dias de idade e o ensaio de absorção de água foi realizado aos 28 dias e para os cps submetidos a cura úmida.

Ensaio de Abatimento de tronco de cone

Para verificar o índice de trabalhabilidade desejado, realizou-se o ensaio descrito na NBR NM 67 (1996), que consiste no abatimento do concreto contido em um tronco de cone padronizado. O traço de referência utilizado foi para um abatimento de 50±10mm. Durante o ensaio, verificou-se a quantidade de aditivo superplastificante necessária para manter o índice de consistência, definido pelo abatimento no tronco de cone, dentro da faixa de 50±10mm.

Resistência à compressão simples.

Para cada grupo de adição (0%, 20% CB-SM e 20% CB-1400), foram moldados 4 corpos de prova, totalizando 36 amostras para caracterização da resistência à compressão simples. A prensa hidráulica manual digital utilizada foi do modelo I-3001-T. Do total de corpos de prova, 12 foram rompidos aos 28 dias e 24 aos 7 dias. Os CPs utilizados são cilíndricos e foram padronizados de acordo com as normas NBR 5738(2015) e NBR5739(2018).

Teor de absorção de água

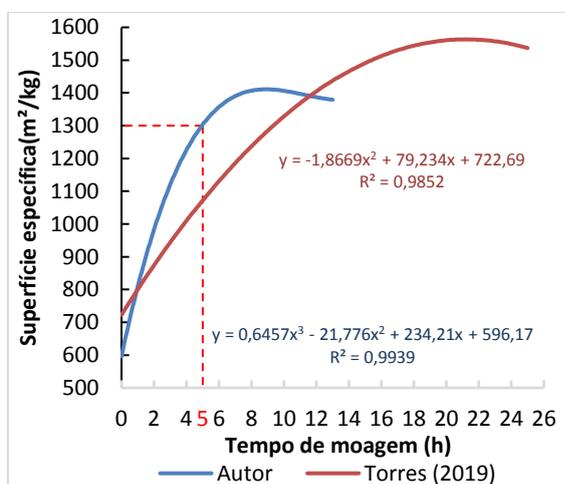
O teor de absorção de água para os CPs foi determinado com de acordo com a NBR 9798 (2009), respeitados os requisitos de aprovação da NBR 8451-1(2020). Para o ensaio foram destinados dois corpos de prova para cada traço de substituição na idade de 28 dias, totalizando 6 unidades.

RESULTADOS

Cominuição da CBCA

No processo de beneficiamento e acompanhamento da superfície específica pelo método Blaine observou-se que, com a utilização do dobro da carga de corpos moedores utilizados no trabalho de Torres (2019), 16kg, o tempo de processamento foi diminuído para a metade, como observado na Figura 10, chegando-se superfície específica de 1300 ± 50 m²/kg, otimizando o tempo de moagem de 10h para 5h.

Figura 10. Evolução da moagem da CBCA estuda quanto à superfície específica.



Fonte: Autor, 2023.

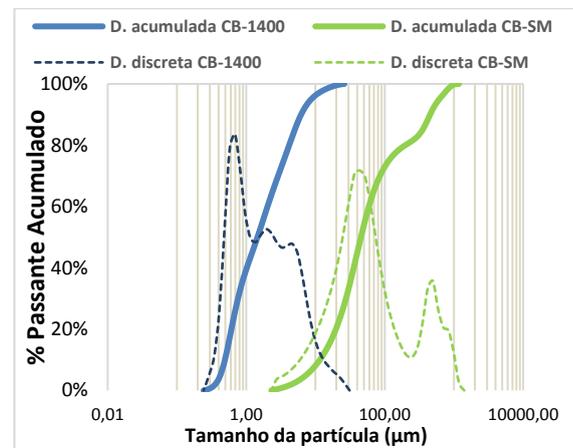
No entanto, a partir das 7h, no patamar dos 1400 ± 50 m²/kg, semelhantemente ao relatado por Freitas (2005) e Cordeiro, Toledo e Fairbairn (2010), iniciou-se a diminuição da taxa do aumento da superfície específica em virtude da aglomeração das partículas da cinza. Diante disso, foi tomada a cinza com o patamar de superfície específica de 1400 ± 50

m²/kg para dar prosseguimento a pesquisa, sendo esta renomeada para CB-1400.

Granulometria a laser, Superfície específica e Massa específica

A Figura 11, com diâmetros médios identificados (Tabela 5), apresenta o resultado do ensaio de granulometria a laser realizada no CETENE.

Figura 11. Distribuição acumulada e discreta das amostras de cinza.



Fonte: Autor, 2023.

Tabela 5 – Diâmetros médios das amostras de cinzas

(µm)	CB-SM	CB-1400
D10	≤ 11,62	≤ 0,49
D50	≤ 45,48	≤ 1,46
D90	≤ 452,90	≤ 6,21

Fonte: Autor, 2023.

Conforme esperado, a cinza resultante do tratamento de cominuição, CB-1400, apresentou um diâmetro médio significativamente menor do que a cinza CB-SM, não tratada, tornando-a mais fina. Esse efeito foi observado através do deslocamento da curva granulométrica para a esquerda.

A Tabela 6 expõe os resultados encontrado para as cinzas tanto quanto a massa específica e como a superfície específica.

Tabela 6 – Massa específica e superfície específica das amostras de CBCA

Cinza	Massa esp. (g/cm ³)	Sup. esp. (m ² /kg)	Patam ar sup. esp. (m ² /kg)	t (h)
CB SM	2,19	573,40	600 ± 50	0,00
CB 1400	2,26	1426,13	1400 ± 50	7,00

Fonte: Autor, 2023.

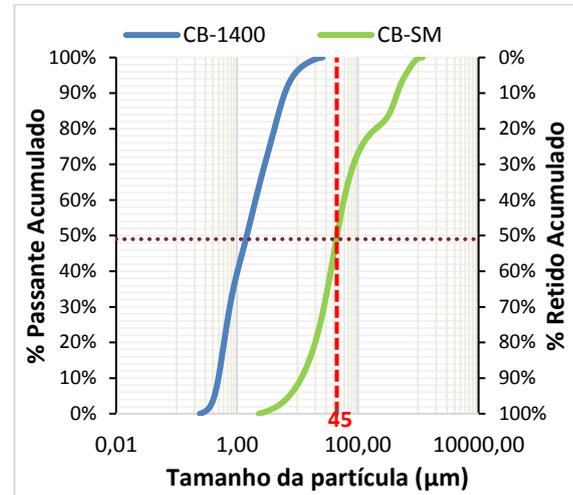
Também como esperado, ao reduzir o tamanho das partículas, ocorreu um aumento significativo da superfície específica, ou seja, da área superficial do material por unidade de massa. Da mesma maneira, houve um aumento da massa específica que, quando um material é moído, as partículas tendem a se compactar mais eficientemente, ocupando menos espaço e resultando em uma maior densidade.

Análise da pozolanicidade

Material retido na peneira 45µm

Através dos dados fornecidos pelo ensaio de granulometria a laser (Figura 12) foi possível determinar as frações retidas das cinzas estudadas. Neste contexto, conforme a NBR 12653 (2015), é determinado que um material será considerado pozolânico caso contenha até 20% de material retido na peneira de 45 µm. Apenas a CB-1400 pode ser considerado um material pozolânico, pois possui 0% de material retido na peneira 45 µm, diferentemente da CB IN SM (sem moer), apresentando 52% de fração retida.

Figura 12. Identificação da porcentagem retida acumulada no diâmetro da peneira de 45µm.

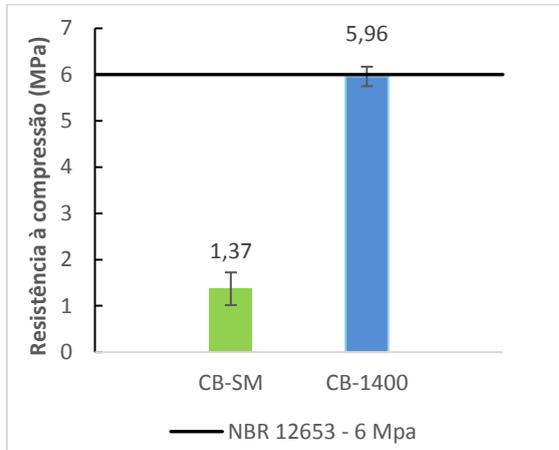


Fonte: Autor, 2023.

Atividade pozolânica com a cal aos sete dias (NBR 5751:2015)

Conforme os requisitos mínimos determinados pela NBR 12653 (2015) para avaliação da pozolanicidade de um material qualquer, dentre outros parâmetros, é requerido uma resistência à compressão simples mínima de 6 MPa, aos 7 dias. Segundo este parâmetro, nenhuma das cinzas estudadas poderiam ser consideradas pozolanas (Figura 13), embora a CB-1400 tenha apresentado resultado menor que 1% da resistência mínima exigida de 6 MPa, no caso, 5,96 MPa.

Figura 13. Resistência à compressão simples dos CPs de argamassa de CBCA com hidróxido de cálcio aos 7 dias.



Fonte: Autor, 2023.

Agra (2022) afirma que o fato de alguns materiais apresentarem resistência à compressão simples com a cal, aos sete dias, abaixo dos 6 MPa -conforme apontado pela norma- seu potencial pozolânico não pode ser descartado. Também comenta que geralmente as pozolanas comerciais apresentam resistência à compressão simples abaixo dos 6 MPa, como os basaltos pozolânicos, utilizados em cimentos pozolânicos.

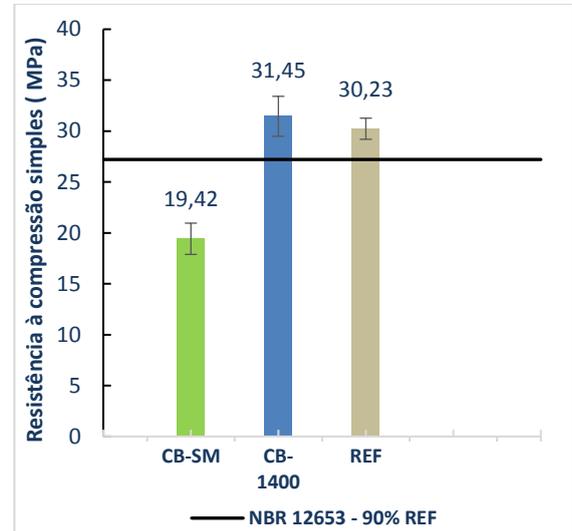
O resultado mostra também que houve um aumento da resistência à compressão simples dos CPs de argamassa com a CBCA, utilizando o tratamento de moagem até a superfície específica de 1400 m²/kg, comparativamente a amostra sem moer, indicando o destaque da metodologia adotada em busca do melhoramento da atividade pozolânica da CBCA.

Índice de desempenho com o cimento Portland (NBR 5752:2014)

A partir dos resultados deste estudo foi possível perceber que, conforme a ABNT NBR 5752 (2014), apenas a amostra de cinza CB-1400 apresentou um índice de desempenho favorável para atividade pozolânica, enquanto a amostra com CB-SM apresentou resultado inferior ao traço de referência, caracterizando um baixo

indicativo para o mesmo. (Figura 14)

Figura 14. Resistência à compressão simples dos CPs de argamassa de CBCA com cimento Portland aos 28 dias.



Fonte: Autor, 2023.

Este resultado pode estar relacionado tanto devido a quantidade de material fino presente na amostra, de maior superfície específica, melhorando o grau de empacotamento das partículas, gerando o chamado efeito fíler, preenchimento, quanto aos produtos resultantes das reações pozolânicas, ambos interferindo a favor nas resistências à compressão simples.

É válido acrescentar também que, conforme Neville (2016), as adições com estas características podem gerar pontos de deposição dos produtos da hidratação do cimento Portland, intensificando a cinética das reações químicas de hidratação, contribuindo para o desenvolvimento da resistência mecânica à compressão simples.

Análise dos concretos – Estado fresco

Em relação a propriedade dos concretos analisados, no estado fresco, percebeu-se que para a mesma faixa de abatimento 50 ± 10 mm, determinada para o traço de referência, o concreto CB IN SM necessitou de mais aditivo superplastificante (Tabela 7).

Tabela 7 – Abatimento e % de aditivo utilizado para abatimento de 50+/-10 mm

Parâmetro	REF	CB SM	CB 1400
Abatimento (mm)	43	41	54
Aditivo plastificante (%)	0,91	2,27	0,91

Fonte: Autor, 2023.

É provável que tenha havido uma sinergia entre diversos fatores, entre estes, o leve aumento da área superficial molhável da cinza adicionada ao cimento e o formato mais achatado e lamelar, esse último, de acordo com Nehdi, Mindess e Aitcin (1998), implicou em uma redução da viscosidade da mistura. Estes autores comentam que, quanto menores e mais esféricas forem as partículas da adição, principalmente quando forem menores que as partículas de cimento, melhores serão as propriedades reológicas dos traços executados, melhorando o rolamento de umas sobre as outras e reduzindo a fricção entre as mesmas, proporcionando o aumento da consistência da pasta, por facilitar um efeito de maior rolamento entre grãos.

Desta forma, esse fator pode ter influenciado na manutenção do intervalo de consistência do concreto com a CB-1400, em relação a amostra de referência (REF).

O concreto com a CB-1400 foi produzidos com a mesma quantidade de aditivo que a mistura de referência, e apresentou um valor de abatimento dentro do intervalo de referência, 50 ± 10 mm. É possível que, com o processo de cominuição, apesar de a superfície específica da cinza se verificar maior que a do cimento, aumentando a área superficial molhável, este processo pode tornar os grãos mais arredondados, e o diâmetro médio das partículas ser menor que o do cimento, gerando com isto o aumento do preenchimento dos vazios entre os grãos de cimento. De acordo com Zhang et al (1996), este processo pode diminuir a demanda de água para preenchimento dos espaços entre

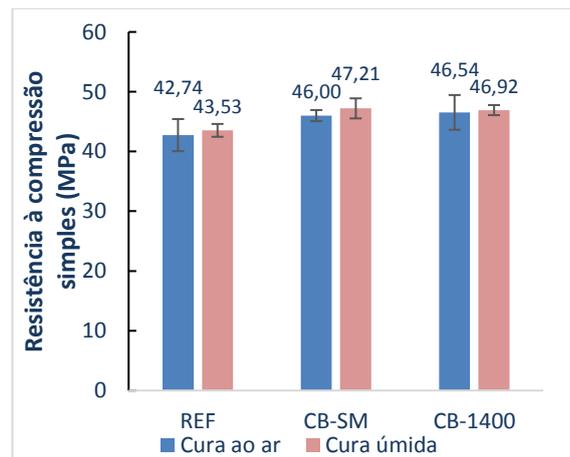
as partículas de cimento, repercutindo no abatimento da mistura.

Análise dos concretos – Estado endurecido

Resistência à compressão aos 7 dias sob diferentes tipos de cura (ao ar e úmida)

Conforme os resultados apresentados na Figura 15, foi possível perceber que o processo de cura ao ar, praticado pela empresa de pré-moldados, não influenciou significativamente nas resistências finais aos sete dias, apresentando uma diferença máxima de 2,56% (CB-SM), na média, e, para baixo, dos valores obtidos na condição de cura úmida. É provável que o resultado da cura ao ar não tenha alterado negativamente os resultados devido ao alto percentual de umidade do ar por encontrar-se próximo a um lago extenso, onde naturalmente a umidade relativa local é maior por conta do fenômeno da evaporação.

Figura 15. Resistência à compressão simples dos CPs de concreto com diferentes curas (ao ar e úmida) rompidos aos 7 dias.



Fonte: Autor, 2023.

Observando a melhor situação dos concretos produzidos quando expostos a condição de cura (Tabela 8), àqueles com adição parcial do cimento pela CBCA apresentaram resistências à compressão

simples maiores em 8,45% (CB-SM – cura úmida) e 8,89% (CB-1400 – cura ao ar), em relação ao traço de referência (REF), indicando um possível indício da atividade pozolânica para os concretos dosados com cinzas moídas até um grau de finura de 1400m²/Kg (CB-1400). Outro possível efeito é físico (efeito filler), devido ao maior preenchimento dos vazios da pasta e um maior empacotamento entre os grãos. O efeito físico de nucleação, de acordo com Neville (2016), pode gerar pontos de deposição dos produtos da hidratação do cimento Portland, intensificando a cinética das reações químicas de hidratação frente a mistura sem a CBCA.

Tabela 8 – Comparativo das resistências à compressão dos corpos de prova sob diferentes situações de cura

CPs	REF	CB SM	CB 1400
Cura ao ar	42,74	46,00	46,54
Cura úmida	43,53	47,21	46,92
% em relação a REF (Cura ao ar)	100,00	7,63	8,89
% em relação a REF (Cura úmida)	100,00	8,45	7,79
% Cura ao ar/ Cura úmida	98,19	97,44	99,19
Diferença percentual (%)	1,81	2,56	0,81

Fonte: Autor, 2023.

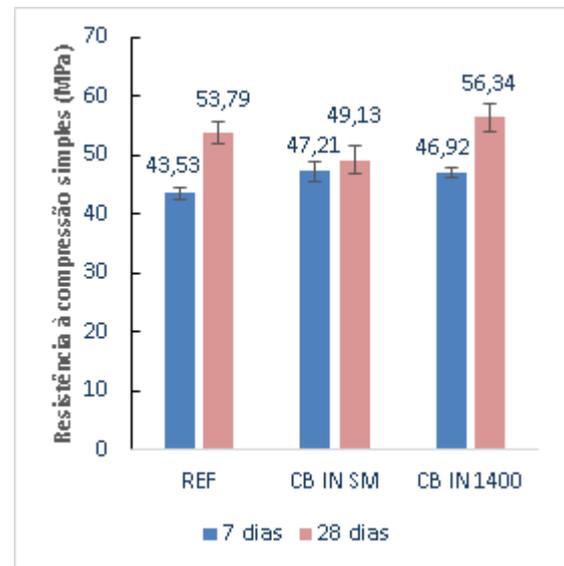
O efeito filler é ressaltado, pois conforme Castro e Pandolfelli (2009), as reações químicas pozolânicas das adições minerais não ocorrem na mesma velocidade que as reações de hidratação do cimento, sendo mais lentas e, portanto, não atuando inicialmente como aglomerante, mas como um material inerte. Levando-se em consideração que a cinza sem grau de moagem suficiente utilizada na produção do concreto (CB-SM) não apresentou atividade pozolânica, portanto o efeito do empacotamento, nesta idade, torna-se mais

provável.

Evolução das resistências à compressão dos 7 aos 28 dias de cura úmida.

A partir dos resultados apresentados (Figura 16), foi possível observar que apenas os concretos produzidos com a mistura CB IN 1400 apresentaram resistências à compressão simples, aos 28 dias de cura, maiores que o traço de referência.

Figura 16. Resistência à compressão dos CPs de concreto com rompidos aos 7 e 28 dias, cura úmida.



Fonte: Autor, 2023.

De acordo com Trigo e Limborio (2012), assim como ocorre com a sílica ativa, a cinza pode preencher os vazios na região de interface da argamassa com o agregado graúdo (chamada de zona de transição), reduzindo a concentração de Ca(OH)₂, que é um cristal maior, mais frágil e poroso, e o transformá-lo em uma fase menor e menos orientada. Este hidrato é consumido durante as reações pozolânicas e também é transformado no C-S-H (silicato de cálcio hidratado), estes fatores em conjunto propiciam o aumento da resistência mecânica dos concretos dosados com esta adição beneficiada com maior grau de moagem. Porém, o valor incrementado desta resistência nos

concretos CB IN 1400 foi de apenas 4,74% (Tabela 9), em relação ao concreto de referência, podendo esta reação ser mais potencializada e visualizada em idades mais avançadas.

Tabela 9 – Comparativo da evolução das resistências à compressão dos CPs de concreto.

MPa	REF	CB-SM	CB-1400
7 dias	43,53	47,21	46,92
28 dias	53,79	49,13	56,34
% resistência de 7 para 28 dias de cura			
% em relação a REF (7 dias)	100,00	108,45	107,79
% em relação a REF (28 dias)	100,00	91,34	104,74

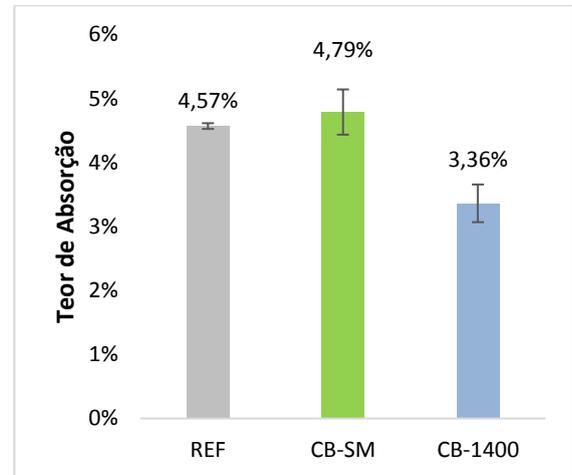
Fonte: Autor, 2023.

Foi observado também que, a mistura com a CBCA sem o beneficiamento da moagem, a CB-SM, apresentou uma evolução de apenas 4,07% das resistências dos 7 para os 28 dias de cura, indicando uma baixa atividade pozolânica, ao passo que a mistura com a CB-1400, obteve uma evolução de 20,08% no patamar das resistências finais aos 28 dias de cura.

Teor de absorção de água

De acordo com os requisitos mínimos para o teor de absorção de água para produção e controle de postes de concreto armado, para a classe de agressividade II, determinados pela NBR 8451-1 (2020), todos os concretos desenvolvidos estão dentro das determinações da norma (Figura 17), pois apresentaram teor de absorção individual bem abaixo do mínimo exigido, ou seja, 7% e também por apresentarem um teor de absorção médio menor que o mínimo de 5,5%.

Figura 17. Teor de absorção dos CPs aos 28 dias de cura úmida.



Fonte: Autor, 2023.

Na Tabela 10, também é possível observar que os concretos produzidos com a amostra CB-1400, com beneficiamento da moagem, obtiveram um redução de 26,42% na permeabilidade de água, consequência da diminuição da porosidade, em relação ao traço de referência.

Tabela 10 – Teor de absorção individual e média dos CPs aos 28 dias de cura úmida

	4,54%	5,14%	3,57%
Absorção média (%)	4,57	4,79	3,36
Média em relação a REF (%)	100,00	104,76	73,58
Diferença Percentual (%)	0	+4,76	-26,42

Fonte: Autor, 2023.

CONCLUSÕES

Com base nos resultados experimentais, as seguintes conclusões podem ser tiradas:

- A moagem influenciou positivamente nos resultados, em termos de pozolanicidade, podendo, a partir desse processo, buscar-se a otimização das variáveis tempo de

moagem e da carga dos corpos moedores para o moinho de bolas;

- O aumento da carga dos corpos moedores do moinhos de bolas otimizou o tempo de moagem mínimo para obtenção de uma cinza com atividade pozolânica;
- Em conjunto com os resultados trazidos pelo trabalho de Torres (2019), é possível associar que, de acordo com os ensaios normativos utilizados, o patamar de superfície específica Blaine de 1400 m²/kg seja um ponto de transição para utilização da CBCA como um material pozolânico;
- O processo de cura ao ar praticado pela empresa não influenciou significativamente nas resistências finais aos sete dias, período mínimo de instalação dos postes de concreto armado, apresentando uma diferença máxima de 2,56%, em relação ao resultado com cura úmida por imersão em água;
- A adição de 20% de CBCA ao concreto resultou em reduções na porosidade e melhorias na resistência à compressão, devido ao efeito físico, melhor empacotamento e possível reação pozolânica;

A CBCA em estudo apresenta-se como uma opção promissora, porém, é crucial que seus efeitos na durabilidade do concreto sejam completamente compreendidos para permitir seu uso em larga escala. Nesse sentido, outras análises se fazem necessárias, como o efeito da CBCA na vida útil do concreto, considerando o ingresso de cloretos e a carbonatação, bem como os efeitos dos possíveis álcalis presentes, a fim de avaliar a sua viabilidade na cadeia de produção de matrizes cimentícias.

AGRADECIMENTOS

Primeiramente agradeço a Deus por tudo, pela saúde, força e perseverança. A ele seja

sempre dada toda honra e toda glória. À minha família, especialmente minha mãe Rejane Maria, padrastrô José Carlos, irmã Maria Gabrielle e avó Noêmia Moreira por todo amor e apoio nas dificuldades, acreditando sempre em mim e sonhando comigo. Obrigado pelo exemplo diário de dedicação e caráter que me fez ser quem eu sou hoje.

À Amanda Larissa, minha namorada, pelo amor e apoio, conselhos, por me fazer feliz, por estar ao meu lado e tornar o percurso.

À minha orientadora Simone Perruci Galvão, pelo apoio, paciência, conhecimento passado e valiosas contribuições para a conclusão do Trabalho de Conclusão de Curso (TCC). Ao Prof. Antônio Acácio de Melo Neto, por fornecer acesso as instalações do Laboratório de Tecnologia de Aglutinantes – Labtag.

Agradecimentos especiais aos novos amigos e colegas do Laboratório de Tecnologia de Aglutinantes - Labtag, Igor Fernandes, Hércules Carvalho, Victor Estolano e Priscila Basto, tanto pelo auxílio técnico quanto na troca de informações durante minha frequência no laboratório.

A Usina Petribú, pela doação do material em estudo na pesquisa: a cinza do bagaço da cana-de-açúcar(CBCA).

Em especial, agradecimentos a Luciana, minha prima, por ter efetuado toda intermediação para a coleta da CBCA.

Aos professores que fizeram e fazem parte do Programa de Graduação em Engenharia Civil da UFRPE, que através das metodologias de ensino foram também fundamentais na minha formação acadêmica, das quais pude replicar em várias situações práticas.

A Edmilson Severino, sócio de uma empresa de pré-moldados, pelo apoio e disponibilidade, cedendo o laboratório de concreto da empresa.

Por fim a todos aqueles estiveram na torcida para a realização deste trabalho e tornar oficial este sonho de ser engenheiro civil, como os amigos João Pedro, Débora, Layanna Karla, Felipe Augusto, entre outros.

REFERÊNCIAS

AGRA, T. M. S. **Avaliação da pozolanicidade da cinza do lodo proveniente de estação de tratamento de água (ETA)**. 2022. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2022.

Disponível em: <https://repositorio.ufpe.br/handle/123456789/45344>. Acesso em: 15 de mar. 2023.

ALI, S.; KUMAR, A.; RIZVI, S. H.; ALI, M.; AHMED, I. Effect of Sugarcane Bagasse Ash as Partial Cement Replacement on the Compressive Strength of Concrete. **Quaid-E-Awam University Research Journal of Engineering, Science & Technology**, Nawabshah, v. 18, n. 2, p. 44-49, 2020.

ANDRADE NETO, J. da S.; FRANÇA, M. J. S. de; AMORIM JÚNIOR, N. S. de; RIBEIRO, D. V. Effects of adding sugarcane bagasse ash on the properties and durability of concrete. **Construction and building materials**, v. 266, p. 120959, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.120959>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0950061820329640>. Acesso em: 18 de mar. 2023.

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

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 15900-1**. Água para amassamento do concreto – Parte 1: Requisitos. Rio de Janeiro: ABNT, 2009.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 16372**. Cimento Portland e outros materiais em pó - Determinação da finura pelo método de permeabilidade ao ar (método de Blaine). Rio de Janeiro: ABNT, 2015.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 16605**. Cimento Portland e outros materiais em pó - Determinação da massa específica. Rio de Janeiro: ABNT, 2017.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5738**. Moldagem e cura de corpos-de-prova de concreto cilíndricos ou prismáticos - procedimento. Rio de Janeiro: ABNT, 2003.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5739**. Concreto - Ensaio de compressão de corpos-de-prova cilíndricos. Rio de Janeiro: ABNT, 2007.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5751**. Materiais pozolânicos – Determinação de atividade pozolânica com a cal aos sete dias. Rio de Janeiro: ABNT, 2015.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5752**. Materiais pozolânicos – Determinação de atividade pozolânica com cimento Portland – Índice de atividade pozolânica com o cimento- Método de ensaio. Rio de Janeiro: ABNT, 2014.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6118**. Projeto de estruturas de concreto – Procedimento. Rio de Janeiro: ABNT, 2014.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7215**. Cimento Portland - Determinação da resistência à compressão de corpos de prova cilíndricos. Rio de Janeiro: ABNT, 2019.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 8451-1**. Postes de concreto armado e protendido para redes de distribuição e de transmissão de energia elétrica – Parte 1: Requisitos. Rio de Janeiro: ABNT, 2020.

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

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

ÁVILA, T. C.; FERNANDES, S. E.; AKASAKI, J. L. A influência da substituição de cimento por cinza do bagaço de cana-de-açúcar (CBC) em concretos. **Revista Científica ANAP Brasil**, v. 9, n. 17, 2016. DOI: <https://doi.org/10.17271/1984324091720161447>. Disponível em: https://publicacoes.amigosdanatureza.org.br/index.php/anap_brasil/article/view/1447/1469. Acesso em: 25 de fev. 2023.

BARBOSA FILHO, M. P.; PRABHU, A. S. **Aplicação de Silicato de Cálcio na Cultura do Arroz**. Santo Antônio de Goiás-GO: Embrapa, 2002. (Embrapa Arroz e Feijão. Circular Técnica, 51). ISSN 1678-9636. Disponível em: https://ainfo.cnptia.embrapa.br/digital/bitstream/CNPAF/19678/1/circ_51.pdf. Acesso em: 20 de dez. 2022.

BESSA, S. A. L. **Utilização Da Cinza Do Bagaço Da Cana-De-Açúcar Como Agregado Miúdo Em Concretos Para Artefatos De Infraestrutura Urbana**. 2011. Tese (Doutorado em Engenharia Urbana) – Universidade Federal de São Carlos, São Carlos. 2011. Disponível em: <https://repositorio.ufscar.br/bitstream/handle/ufscar/4184/4074.pdf?sequence=1&isAllowed=y>. Acesso em: 23 de dez. 2022.

BRAGA, L. S.; SANTOS, M. V. B. P. dos; ALTRAN, D. A.; FIGUEIREDO, F. B. Análise das propriedades do concreto

estrutural utilizando a cinza pesada do bagaço da cana-de-açúcar. **Colloquium Exactarum**, p. 01-14, 2017. Disponível em: <https://journal.unoeste.br/index.php/ce/article/view/1930/1970>. Acesso em: 20 de dez. 2022.

CASTRO, A. L.; PANDOLFELLI, V. C. Revisão: Conceitos de dispersão e empacotamento de partículas para a produção de concretos especiais aplicados na construção civil. **Cerâmica**, v. 55, p. 18-32, 2009. DOI: <https://doi.org/10.1590/S0366-69132009000100003>. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/ce/a/6jsRNJDKJHCNCczb3fMfLFv/?format=pdf&lang=pt>. Acesso em: 1 de mar. 2023.

CASTRO, T. R. de; MARTINS, C. H. Avaliação da adição de cinzas do bagaço de cana-de-açúcar em argamassas mistas. **Ambiente Construído**, Porto Alegre, v. 16, n. 3, p. 137-151, jul./set. 2016. DOI: <https://doi.org/10.1590/s1678-86212016000300097>. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/ac/a/jSXXkd5CCXQgXgztXt6cmxD/?format=pdf&lang=pt>. Acesso em: 1 de mar. 2023.

COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO. **Acompanhamento da safra brasileira de cana-de-açúcar**. v. 9, n. 3. Brasília: CONAB, 2022. Disponível em: https://www.conab.gov.br/info-agro/safras/cana/boletim-da-safra-de-cana-de-acucar/item/download/45671_7a038e9b1579f67261d6351884075e16. Acesso em 15 fev. 2021.

CORDEIRO, G. C. **Utilização de cinzas ultrafinas do bagaço da cana-de-açúcar e da casca de arroz como aditivos minerais em concreto**. 2006. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2006. Disponível em: <http://www.coc.ufrj.br/pt/component/docm>

an/?task=doc_download&gid=848&Itemid
=. Acesso em: 25 de out. 2022.

CORDEIRO, G. C.; TOLEDO FILHO, R. D.; FAIRBAIRN, E. de M. R. Cinza ultrafina do bagaço de cana-de-açúcar: material pozzolânico de alto potencial para países tropicais. **Revista IBRACON de Estruturas e Materiais**, v. 3, p. 50-67, 2010. Disponível em: http://www.scielo.br/pdf/riem/v3n1/en_04.pdf. Acesso em: 27 de ago. 2020.

DEMATTE, J. L. I.; PAGGIARO, C. M.; BELTRAME, J. A.; RIBEIRO, S. S. Uso de silicatos em cana-de-açúcar. **Informações Agronômicas**, v. 133, p. 7-12, 2011. Disponível em: [http://www.ipni.net/PUBLICATION/IA-BRASIL.NSF/0/CF832453F89BC9D483257A8F005F59AE/\\$FILE/Page7-12-133.pdf](http://www.ipni.net/PUBLICATION/IA-BRASIL.NSF/0/CF832453F89BC9D483257A8F005F59AE/$FILE/Page7-12-133.pdf). Acesso em 11 de set. 2021.

FERNANDES FILHO, P.. 2012. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) – Universidade Federal da Paraíba, João Pessoa, 2012. Disponível em: <https://repositorio.ufpb.br/jspui/bitstream/123456789/13980/1/Arquivototal.pdf>. Acesso em: 16 de nov. 2022.

FREITAS, E. S. **Caracterização da cinza do bagaço da cana-de-açúcar do município de campos dos Goytacazes para uso na construção civil**. 2005. Dissertação (Mestrado em Engenharia civil) – Universidade Estadual do Norte fluminense Darcy Ribeiro, Campos dos Goytacazes, 2005. Disponível em: <https://uenf.br/cct/leciv/files/2015/01/10.pdf>. Acesso em: 25 de out. 2022.

GOMES, L. S.; FURTADO, A. C. R.; SOUZA, M. C. A Sílica e suas Particularidades. **Revista Virtual de Química**, v. 10, n. 4, 2018. Disponível em: <https://s3.sa-east-1.amazonaws.com/static.sites.s bq.org.br/rvq.s bq.org.br/pdf/v10n4a19.pdf>. Acesso em: 25 de out. 2022.

HOJO, L. Y. C. P.; MARTINS, C. H. Utilização da substituição parcial do cimento por cinza leve de cana-de-açúcar em concretos. **MIX Sustentável**, v. 1, n. 1, p. 127–141, 2015. DOI: <https://doi.org/10.29183/2447-3073.MIX2015.v1.n1.127-141>. Disponível em: <https://ojs.sites.ufsc.br/index.php/mixsustentavel/article/view/1135/515>. Acesso em: 26 de out. 2022.

HUSSEIN, A. A. E.; SHAFIQ, N.; NURUDDIN, M. F.; MEMON, F. A. Compressive strength and microstructure of sugar cane bagasse ash concrete. **Research Journal of Applied Sciences, Engineering and Technology**, v. 7, n. 12, p. 2569-2577, 2014. DOI: 10.19026/rjaset.7.569. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/287501413_Compressive_Strength_and_Microstructure_of_Sugar_Cane_Bagasse_Ash_Concrete#read. Acesso em: 27 de ago. 2022.

LOPES, J. P.; RUDNICK, T.; MARTINS, C. H. Utilização de resíduos industriais para produção de concreto sustentável. **Revista Eletrônica de Engenharia Civil**, v. 14, n. 2, p. 216-228, 2018. DOI: <https://doi.org/10.5216/reec.v14i2.49261>. Disponível em: <https://revistas.ufg.br/reec/article/view/49261/pdf>. Acesso em: 11 de set. 2022.

MARTINS, R. Energia produzida a partir do bagaço da cana é economicamente viável. **Inovação Tecnológica**, São Paulo, 2009. Disponível em: <https://www.inovacaotecnologica.com.br/noticias/noticia.php?artigo=energia-produzida-partir-bagaco-cana-economicamente-viavel&id#.YIxL2JBKjIU>. Acesso em: 17 ago. 2020.

MELLO, L. C. de A.; ANJOS, M. A. S. dos.; SÁ, M. V. V. A. de.; SOUZA, N. S. L.

de.; FARIAS, E. C. de. Effect of high temperatures on self-compacting concrete with high levels of sugarcane bagasse ash and metakaolin. **Construction and Building Materials**, v. 248, p. 118715, 2020. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2020.118715. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/340035970_Effect_of_high_temperatures_on_self-compacting_concrete_with_high_levels_of_sugarcane_bagasse_ash_and_metakaolin. Acesso em: 18 de ago. 2022.

NEHDI, M.; MINDESS, S.; AITCIN, P. C. Rheology of high-performance concrete: effect of ultrafine particles. **Cement and Concrete Research**, v. 28, n. 5, p. 687-697, 1998. Disponível em: https://www.academia.edu/25261707/Rheology_of_High_Performance_Concrete_Effect_of_Ultrafine_Particles. Acesso em: 15 de out. 2022

NEVILLE, A. M. **Propriedades do concreto**. 5. ed. Bookman Editora, 2015.

PAULA, M. O. **Potencial da cinza do bagaço da cana de açúcar como material de substituição parcial de cimento Portland**. 2006. Tese (Pós-Graduação em Engenharia Agrícola) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG, pp.77, 2006. DOI: <https://doi.org/10.1590/S1415-43662009000300019>. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/rbeaa/a/34KLycZYPyhR3qSYgyqJcDy/?lang=pt>. Acesso em: 20 de set. 2022.

RERKPIBOON, A.; TANGCHIRAPAT, W.; JATURAPITAKKUL, C. Strength, chloride resistance, and expansion of concretes containing ground bagasse ash. **Construction and building materials**, v. 101, p. 983-989, 2015. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2015.10.140. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/284119402_Strength_chloride_resistance_a

[nd_expansion_of_concretes_containing_ground_bagasse_ash](#). Acesso em:

SEARLE A. B.; GRIMSHAW, R. W. **The chemistry and physics of clays**. 1 ed. London: Ernest Benn Limited, 1923. Disponível em: <https://archive.org/details/in.ernet.dli.2015.125964/page/n1/mode/2up>. Acesso em: 17 mar. 2021.

SESSA, T. D. C. **Avaliação da utilização da cinza do bagaço de cana-de-açúcar em concreto usando construções residenciais de menor impacto**. 2013. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Civil) – Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2013. Disponível em: <https://pantheon.ufrj.br/handle/11422/9570>. Acesso em: 20 de abr. 2022.

SOARES, A. P. **Ampliação da oferta de energia elétrica utilizando a cogeração a partir do bagaço da cana-de-açúcar**. 2016. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Ciências Econômicas) – Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2016.

SOUZA, A. E.; TEIXEIRA, S. R.; SANTOS, G. T. A.; COSTA, F. B.; LONGO, E. Reuse of sugarcane bagasse ash (SCBA) to produce ceramic materials. **Journal of Environment Management**, vol. 92, out. 2011, pg. 2774-2780. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.jenvman.2011.06.020>. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/51471590_Reuse_of_sugarcane_bagasse_ash_SCBA_to_produce_ceramic_materials#read. Acesso em:

TISDALE, S.; NELSON, W.; BEATON, J. **Soil fertility and fertilizers**. 4th ed. London: Macmillan Publishers, 1985. 754 p.

TORRES, S. M. **Aplicação da difração de raios x na análise do potencial pozolânico**

da cinza do bagaço da cana-de-açúcar para adição ao cimento Portland. 2019. Tese (Doutorado em Engenharia Civil – Estruturas com ênfase em construção civil) – Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2019. Disponível em: <https://repositorio.ufpe.br/handle/123456789/33211>. Acesso em: 3 de mar. 2022.

TRIGO, A. P. M.; LIBORIO, J. B. L. **Estudo da dopagem de agregados para finalidade de uso em concretos estruturais.** 2012. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Universidade de São Paulo, São Carlos, 2012. DOI: 10.11606/T.18.2012.tde-10092012-100027 Disponível em: https://teses.usp.br/teses/disponiveis/18/18134/tde-10092012-100027/publico/2012DO_AnaPaulaMorenoTrigo.pdf. Acesso em: 1 de mar. 2023.

TUTIKIAN, B. F.; ISAIA, G. C.; HELENE, P. **Concreto de Alto e Ultra-Alto Desempenho.** Concreto: Ciência e Tecnologia, 1. ed. São Paulo: Ibracon, 2011, v. 2, p. 1283-1325.

ZHANG, C.; WANG A.; TANG, M.; LIU, X. The filling role of pozzolanic material. **Cement and concrete research**, v. 26, n. 6, p. 943-947, 1996. DOI: [https://doi.org/10.1016/0008-8846\(96\)00064-6](https://doi.org/10.1016/0008-8846(96)00064-6). Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/0008884696000646>. Acesso em 15 de mar. 2023.