

Efeitos da adição de cinza de bagaço de cana-de-açúcar nas propriedades de argamassas cimentícias

Iago Cavalcanti Pontes, Lizabeth Fernanda Araújo Campos, Ricardo Peixoto Suassuna Dutra*

¹DEMat/PPCEM/CT/UFPB, Cidade Universitária s/n, Castelo Branco, 5805190, João Pessoa, PB, Brasil
iagocpontes@gmail.com; lizabeth@hotmail.com; *ricardopsd@gmail.com

Resumo:

A busca por diferentes tipos de matérias-primas para a construção civil tem sido intensificada na tentativa de descobrir novos materiais que possam substituir insumos, trazendo vantagens econômicas e ambientais. A presente pesquisa investigou a potencialidade pozolânica da cinza de bagaço de cana-de-açúcar residual com elevado teor de carbono e a viabilidade do seu emprego em sistemas cimentícios, após o seu beneficiamento. As caracterizações das cinzas foram realizadas por meio dos ensaios de fluorescência de raios X e difração de raios X, sendo também realizados ensaios para a avaliação da atividade pozolânica com cal. Para verificação da viabilidade técnica de argamassas com cinza beneficiada foram moldados corpos-de-prova com diferentes porcentagens de cinzas em substituição parcial do cimento Portland, analisando-se a evolução da resistência à compressão axial aos 7 e 28 dias de idade. Os resultados de caracterização mostraram que os procedimentos controlados de moagem e requeima geraram cinzas com potencial reativo para adição mineral, com características típicas de materiais pozolânicos. As propriedades mecânicas das argamassas confeccionadas com adições de cinza beneficiada em substituição do equivalente da massa de cimento justificam seu uso, visto que os níveis de resistência à compressão axial apresentados não trazem sérios comprometimentos em relação à argamassa de cimento convencional.

Palavras-Chave: Cinza de bagaço de cana-de-açúcar; Propriedades; Pozolana; Argamassa cimentícia; Sustentabilidade.

1. INTRODUÇÃO

A atual sociedade tecnológica possui desafios cada vez maiores na busca da sua sustentabilidade, ganhando relevância num contexto em que ações empresariais são apontadas como principais causadoras da degradação ambiental e social [1]. Os materiais de construção civil têm sido avaliados não só de acordo com suas propriedades e seu desempenho, mas também quanto à forma como são produzidos e o impacto que os processos de produção geram ao meio ambiente, verificando-se elevado consumo de matérias-primas, água e energia, além da gigantesca geração de resíduos [2]. O desenvolvimento de ações visando o gerenciamento eficaz desses resíduos parte da realização de um diagnóstico local, identificando aspectos referentes à origem, taxa de geração, agentes envolvidos na geração e coleta, destinação final, entre outros [3].

O cimento Portland é o principal material aglomerante usado mundialmente para a produção de pastas, argamassas e concretos, registrando, em 2021, produção mundial de 4,4 bilhões de toneladas e só no Brasil de 65 milhões de toneladas [4]. Considerando que para cada tonelada de cimento

produzida no Brasil são emitidos 600 kg de CO₂ [5], a produção registrada em 2021 mostra que o país contribuiu com a emissão de cerca de 39 milhões de toneladas de CO₂ para a atmosfera.

A consciência da importância e da necessidade de utilização, pelo ramo da construção civil, de resíduos gerados em outros setores da economia tem sido intensificada na tentativa de descobrir novos materiais que possam substituir insumos, em virtude do aumento da atividade industrial e, por conseguinte, do incremento da geração de subprodutos, bem como devido à redução da disponibilidade de matérias-primas não renováveis, indispensáveis às atividades da construção civil convencional. Uma alternativa para a solução da gestão dos resíduos industriais passa por ações em que grande parte desses resíduos pode ser reciclada, reutilizada, transformada e incorporada, de modo a produzir novos materiais de construção, para atender à crescente demanda por tecnologia alternativa de construção mais eficiente, econômica e sustentável que impacte o mínimo possível durante seu processo de fabricação e pós-uso [6].

As cinzas vegetais destacam-se entre os demais resíduos por serem resultados diretos da maior atividade econômica do país, a agroindústria, sendo a cinza do bagaço da cana-de-açúcar (CBC) o subproduto resultante da maior dessas atividades, a agroindústria sucroalcooleira. O Brasil é um dos grandes produtores de cana-de-açúcar no mundo, com 568,4 milhões de toneladas processadas na safra 2021/2022, em uma área de 8,2 milhões de hectares [7]. Tomando-se por base que são produzidos aproximadamente 260 quilos de bagaço por tonelada de cana-de-açúcar processada [8], com quase 90% sendo empregados como combustível nas caldeiras [9] e que cada tonelada de bagaço incinerado gera aproximadamente 25 quilos de cinza residual [10], estima-se que, diante da produção de 568,4 milhões de toneladas de cana-de-açúcar, são produzidos no Brasil por volta de 3,3 milhões de toneladas de cinza residual que não possui um fim racional e deverá, dessa forma, contribuir ainda mais para a poluição do solo e aquíferos, problema já enfrentado pelos administradores das usinas no que diz respeito à disposição final desse resíduo.

Sabe-se que a CBC é composta predominantemente por sílica, um composto químico com potencial pozolânico, tornando-se um material com grande potencial para ser utilizado na confecção de argamassas e concretos, substituindo parte do cimento Portland [11]. Tendo em vista a aplicação de adições minerais em sistemas cimentícios, o principal objetivo deste trabalho é avaliar o desempenho de argamassas confeccionadas com cinzas de bagaço de cana-de-açúcar (CBC), em substituição parcial ao cimento Portland do tipo CP V-ARI MAX, após passarem por sistemas controlados de beneficiamento. Especificamente busca-se: a) realizar procedimentos de beneficiamento de CBC coletada no engenho, com elevado teor de carbono, para obtenção de cinzas apropriadas à produção de argamassas cimentícias, e estudar suas características pozolânicas; b) promover a caracterização química da CBC, antes e após o seu beneficiamento, para melhor adequação como adição mineral em compósitos cimentícios; c) analisar o comportamento mecânico de argamassas confeccionadas com a adição de diferentes teores de CBC beneficiada.

2. MATERIAIS E MÉTODOS

Os experimentos deste trabalho seguiram as seguintes etapas: a) obtenção da CBC a ser estudada; b) caracterização das CBCs in natura (submetida à secagem e peneiramento) e beneficiada (pelos métodos de moagem e, posterior, requeima); c) análise da aplicação da CBC beneficiada em argamassa, empregada em diferentes teores de substituição parcial do cimento CP V-ARI MAX, cujos desempenhos foram avaliados em ensaios mecânicos de resistência à compressão axial (Fig.1).

A CBC foi fornecida pelo Engenho Ipueira (Areia/PB), apresentando aspecto úmido e coloração preta, sendo sujeita a uma técnica de secagem em estufa a 100 °C durante 24 horas, sendo passada em peneira de abertura de 2 mm, para separação de restos de bagaço de cana que não sofreram combustão completa. Em seguida, a CBC passou por um beneficiamento, realizado a seco, em moinho rotativo de bolas (Chiarotti), com bolas de alumina, com diâmetro de 19 mm, massa total de 1800 g. 450 g da amostra foram moídas em cada batelada. O processo de moagem das cinzas se deu em dois tempos diferentes em moinho de bolas: 10 minutos e 3 horas. A moagem curta, por 10 minutos, tem por finalidade promover a homogeneização da CBC, constituindo um processo simples, rápido e de pouco consumo de energia, enquanto que a moagem longa, por 3 horas, foi utilizada para fragmentar o material, tornando-o mais fino, objetivando dar maior reatividade à CBC, pelo refinamento das

partículas, ou mesmo, melhorando o empacotamento dos grãos quando adicionada às misturas cimentícias. Em seguida, a CBC passou por processo de requeima, baseado no estudo de [12], sendo queimada por 3 horas em forno mufla em temperatura de 300 °C mais 3 horas em temperatura de 600 °C [12]. O material resultante assumiu uma coloração clara.

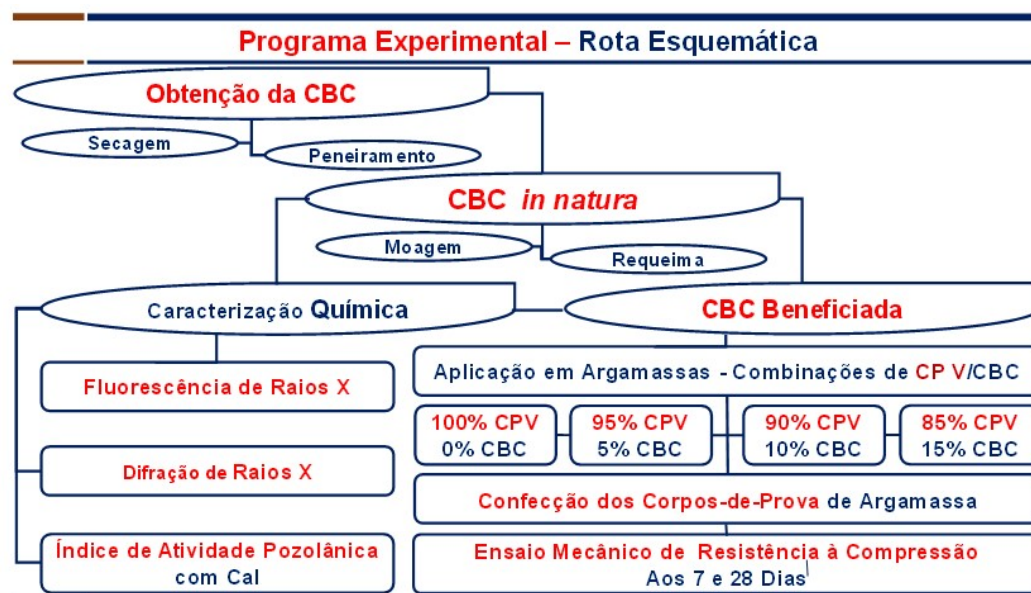


Figura 1. Esquema das etapas que compõem o programa experimental

As composições químicas das CBCs in natura e beneficiada foram determinadas pela fluorescência de raios X (FRX), sendo utilizado o equipamento EDX-720 da marca Shimadzu. As amostras foram compactadas em formato de pastilhas em prensa hidráulica (Briquetting Machine MP-35), posteriormente, analisadas por espectroscopia de energia dispersiva de raios X, sob atmosfera ambiente. Foram analisados: SiO₂, Al₂O₃, Fe₂O₃, MgO, CaO, K₂O, entre outros. Os limites de detecção inferiores variam dependendo da matriz da amostra e elementos coexistentes, variando de 100 ppm até 0,1 ppm.

O teor de matéria orgânica das cinzas foi determinado pelo ensaio de perda ao fogo, a 900 °C, por 3 horas. A estrutura do arranjo atômico das cinzas e a identificação de fases presentes foi determinada pelo ensaio de difração de raios X (DRX), utilizando-se para tanto um difratômetro de raios X (Shimadzu XRD6000), com radiação K α do Cu (40kV/30mA) e velocidade do goniômetro de 2°/min, passo de leitura de 0,02°, com 2 θ variando de 5 até 60°. A análise dos difratogramas foi feita por meio do software Origin Scientific Graphing.

Para determinação do índice de atividade pozolânica com cal, de acordo com a NBR 5751 [13], a argamassa para este ensaio foi organizada com quatro porções de areia quartzosa, uma porção de Ca(OH)₂, hidróxido de cálcio (cal), e duas porções de CBC. A água foi acrescentada até alcançar o índice de consistência igual a 225 \pm 5 mm, de acordo com a NBR 7215 [14]. A atividade pozolânica com cal foi obtida pela resistência à compressão dos corpos-de-prova aos 7 dias de cura.

Na composição das argamassas foi utilizado o cimento Portland de alta resistência inicial, escolhido por não conter adições (apesar de poder conter até 5% em massa de material carbonático), para melhor explorar os efeitos da adição de CBC em misturas cimentícias, sem a influência de adições existentes em outros tipos de cimento.

Para a dosagem das composições de argamassa convencional, partiu-se do princípio que as relações água/aglomerante e agregado/aglomerante seriam mantidas constantes, variando-se apenas o teor de substituição de CBC em relação à massa do cimento. As argamassas foram confeccionadas a partir da determinação inicial das relações água/aglomerante de 0,5 e agregado/aglomerante de 2,5.

Assim, foram moldados corpos-de-prova com cimento CPV-ARI MAX e utilizados como referência e, também, corpos-de-prova com substituição parcial deste cimento pela CBC beneficiada, nos percentuais de 5, 10, e 15%, com traços de argamassas mostrados na Tabela 1.

Tabela 1. Definição dos traços de argamassas

Composições de argamassa	Água/Aglo-merante	Composição dos Materiais (kg)				
		Aglomerantes			Areia	Água
		Total (a+b)	CP V-ARI (a)	CBC (b)		
100% CP V/ 0% CBC	0,5	1,500	1,500	0	3,750	0,750
95% CP V/ 5% CBC	0,5	1,500	1,425	0,075	3,750	0,750
90% CP V/ 10% CBC	0,5	1,500	1,350	0,150	3,750	0,750
85% CP V/ 15% CBC	0,5	1,500	1,275	0,225	3,750	0,750

Os corpos-de-prova das argamassas foram deixados em repouso durante 24 horas, protegidos do sol e em ambiente ventilado, depois, sendo desmoldados e submetidos ao processo de cura por imersão em tanque de água saturada de cal, até completar os ciclos de 7 e 28 dias determinados para realização do ensaio de resistência à compressão.

Nas datas agendadas para o rompimento, os corpos-de-prova foram retirados da água e passaram por um processo de capeamento com enxofre, com o objetivo de regularizar a superfície de carregamento das amostras e assegurar uma maior confiabilidade nos resultados do ensaio.

Os ensaios de resistência à compressão das argamassas foram realizados de acordo com a NBR 7215 [14]. Foram determinadas as resistências nas idades de 7 e 28 dias, sendo rompidos 5 corpos-de-prova para cada idade com as diferentes combinações percentuais de cimento Portland CPV - CBC, em peso, a saber: (100-0), (95-5), (90-10), (85-15). Assim, todas as argamassas produzidas com substituição parcial de cimento Portland foram comparadas ao traço sem adição de CBC, denominado argamassa de referência. A resistência à compressão das argamassas foi definida por meio da ruptura de corpos-de-prova cilíndricos, com 5 cm de diâmetro por 10 cm de altura, operada manualmente em prensa hidráulica universal de ensaios mecânicos (Emic PC200C).

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1 Caracterização das CBCs in natura e Beneficiada

3.1.1 Composição química determinada por espectroscopia de fluorescência de raios X

A composição química das cinzas de bagaço de cana-de-açúcar das amostras obtidas antes e após os processos controlados de moagem e requeima, identificadas, respectivamente, por CBC in natura e CBC beneficiada, realizada por espectroscopia de fluorescência de raios X, encontra-se discriminada na Tab.2, que possibilitou a determinação da composição dos óxidos nas amostras analisadas. Também são apresentados os resultados dos ensaios realizados da perda ao fogo, de acordo com procedimentos prescritos na NBR NM 18 [15].

Tabela 2. Composição química das amostras de CBCs in natura e beneficiada realizada por espectroscopia de fluorescência de raios X

Composto químico	Composição química da CBC (teor em %)	
	In natura	Beneficiada
SiO ₂	53,61	67,31
Al ₂ O ₃	1,38	3,77
Fe ₂ O ₃	1,19	1,66
K ₂ O	7,14	8,17
MgO	5,70	5,28
CaO	5,91	4,57
P ₂ O ₅	4,88	3,76
SO ₃	0,49	0,40
Outros	1,70	0,69
Perda ao fogo	18,01	4,38

Uma pozolana reativa deve apresentar em sua composição química um teor mínimo de 70% do somatório dos óxidos de SiO_2 , Al_2O_3 e Fe_2O_3 , perda ao fogo igual ou inferior a 10% e teor de SO_3 máximo de 4%, de conformidade com requisitos estabelecidos pela NBR 12653 [16].

De acordo com a Tab.1, a CBC in natura, coletada e simplesmente secada e peneirada, ao registrar 56,18% do total de valores de óxidos de SiO_2 , Al_2O_3 e Fe_2O_3 , e perda ao fogo de 18,01%, não atende às exigências da norma, com exceção da condição de teor de SO_3 máximo do material, correspondente a 0,49%, devendo-se o não enquadramento, possivelmente, à grande quantidade de matéria orgânica presente em sua composição. A CBC beneficiada apresenta valores percentuais especificados dos óxidos de SiO_2 , (67,31), Al_2O_3 (3,77) e Fe_2O_3 (1,66) totalizando 72,74%, teor de SO_3 de 0,40% e perda ao fogo de 4,38%, atendendo às recomendações da norma e possibilitando a sua utilização como material pozolânico na produção de argamassas, visto que a presença desses óxidos nos níveis registrados favorece a produção de produtos de hidratação.

3.1.2. Caracterização mineralógica determinada por difratometria de raios X

Os difratogramas obtidos das CBCs estudadas apresentaram comportamentos similares, com picos correspondentes à presença de fases cristalinas, identificadas com o software Xpert, da sílica (SiO_2) nas formas de cristobalita (C) e quartzo (Q) (Fig.2).

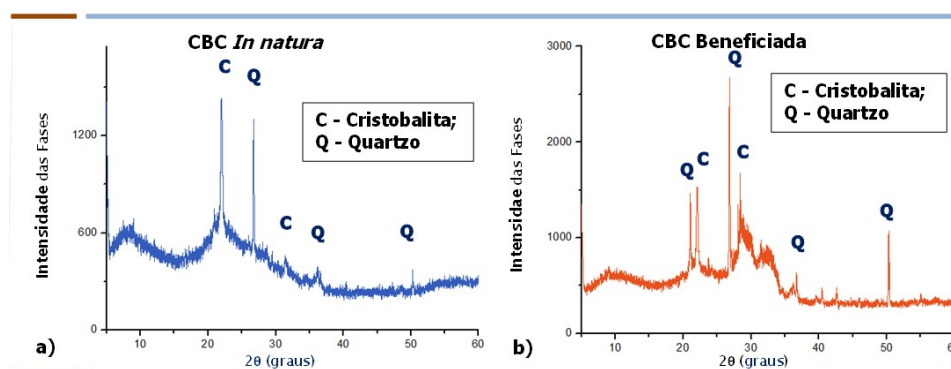


Figura 2. Difratogramas de raios X das CBCs: a) in natura e b) beneficiada.

O difratograma da CBC mostra a intensidade das fases, em contagens por segundo (CPS), dada em função do ângulo de difração 2θ (ângulo de Bragg). Comparando-se os resultados, observa-se na CBC in natura, picos de cristobalita em $2\theta = 22,02^\circ$ e $2\theta = 36,16^\circ$ e de quartzo em $2\theta = 20,87^\circ$, $2\theta = 26,65^\circ$ e $2\theta = 50,17^\circ$, semelhantes aos espectros observados no difratograma da CBC beneficiada, em que os picos mostram a presença de cristobalita em $2\theta = 22,02^\circ$ e $2\theta = 28,49^\circ$ e de quartzo em $2\theta = 20,99^\circ$, $2\theta = 26,81^\circ$, $2\theta = 36,79^\circ$ e $2\theta = 50,47^\circ$. No entanto, ambos os difratogramas apresentam um espectro de difração mais difuso, indicando a presença de material não cristalino. O halo entre $2\theta = 6^\circ$ e 18° caracteriza a fase amorfa, segundo Villar-Cociña et al. [17].

Deve-se ressaltar que é amplamente aceito o fato de que fases amorfas tendem a ser mais reativas que as cristalinas e, conseqüentemente, os halos amorfos observados nos difratogramas das CBCs investigadas devem promover uma maior reatividade quando utilizadas como materiais cimentícios suplementares.

3.1.3. Avaliação da atividade pozolânica das CBCs in natura e beneficiada: índice de atividade pozolânica com cal

O índice de atividade pozolânica (IAP) com cal das cinzas estudadas é apresentado na Fig.3. É possível observar que a CBC in natura não pode ser classificada como pozolana, por ter apresentado valor do IAP com cal de 4,9 MPa, bem inferior ao mínimo de 6 MPa estabelecido pela NBR 5751 [13], norma que estabelece os critérios de classificação de pozolanas no Brasil. Este fato pode ser justificado pela composição química inadequada mostrada anteriormente, uma vez que apresenta insatisfatória concentração de SiO_2 (53,61%) e alta perda ao fogo (18,01%).

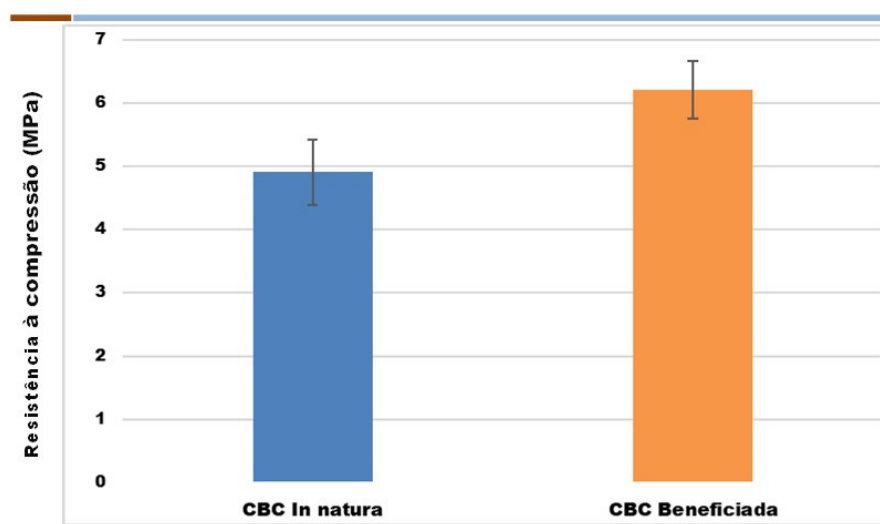


Figura 3. Índice de atividade pozolânica com cal das CBCs in natura e beneficiada.

Entretanto, a CBC beneficiada foi classificada como pozolana, visto que atendeu aos requisitos da norma, alcançando IAP de 6,2 MPa. Esses resultados favoráveis são decorrentes dos valores obtidos na composição química (alta concentração de sílica e baixo teor de carbono) e da granulometria mais fina de suas partículas. De acordo com Cordeiro et al. [12], as moagens foram realizadas no intuito de equiparar a granulometria das cinzas produzidas sob diferentes temperaturas e o método de queima adotado revela-se muito adequado para a remoção de carbono e compostos voláteis presentes na cinza, visto que a perda ao fogo diminui significativamente à medida que a temperatura de queima aumenta.

3.2. Avaliação do desempenho mecânico de argamassas cimentícias produzidas com a incorporação de CBC beneficiada

Os ensaios de resistência à compressão realizados nos corpos-de-prova testados, em função da interação entre o teor de substituição aos 7 e 28 dias de idade, estão mostrados na Tab.3 e na Fig.4, evidenciando os resultados da evolução da resistência à compressão média das argamassas ao longo do tempo.

Tabela 3. Resultados dos ensaios de resistência à compressão axial média das argamassas aos 7 e 28 dias após a moldagem dos corpos-de-prova

Composição da argamassa	Resistência à compressão axial (MPa)			
	Aos 7 dias	Desvio padrão	Aos 28 dias	Desvio padrão
100% CP V/0% CBC	28,90	2,906	36,79	6,312
95% CP V/5% CBC	28,01	2,998	34,42	2,006
90% CP V/10% CBC	25,24	2,406	34,08	3,106
85% CP V/15% CBC	23,22	2,358	28,48	1,552

Os resultados encontrados evidenciam que, em comparação com a argamassa de referência, as argamassas com adição tiveram redução da resistência, conforme se aumenta a porcentagem adicionada de CBC. Para a composição 95% CP V/5% CBC, os declínios da resistência à compressão foram 3,08% aos 7 dias e 6,44% aos 28 dias de cura. Para o traço 90% CP V/10% CBC, as reduções da resistência à compressão corresponderam a 12,52% aos 7 dias e 7,37% aos 28 dias de cura. Para o traço 85% CP V/15% CBC, as reduções da resistência à compressão alcançaram 19,65% aos 7 dias e 22,59% aos 28 dias de cura.

A redução das resistências mecânicas pode ser atribuída às altas temperaturas de combustão (800 °C a 1000 °C) pelas quais o bagaço foi submetido, contribuindo para cinzas com presença de sílica cristalina, menos reativa com o cimento. Xu et al. [18] confirmam que cinzas cristalinas tendem

a diminuir as propriedades mecânicas. De Paula et al. [19] verificaram o potencial uso de cinzas do bagaço de cana-de-açúcar em substituição parcial do cimento em argamassas. Observaram que a resistência à compressão das argamassas aos 7 dias é inversamente proporcional ao teor de cinza adicionado. Considerados aos 28 dias, os resultados das combinações com melhor teor de substituição foram estatisticamente iguais entre si até a taxa de 20% de substituição parcial do cimento por CBC, sem prejuízo da resistência à compressão.

Em que pese o registro dos valores para a resistência à compressão situados abaixo dos obtidos da argamassa de referência (28,90 MPa aos 7 dias e 36,79 MPa aos 28 dias), porém em patamares aceitáveis do ponto de vista da aplicação em obras de engenharia, com ou sem restrição de uso, as combinações com acréscimo de CBC nos níveis estudados podem ser recomendadas de conformidade com as especificações técnicas projetadas para atender às exigências estruturais de argamassas, levando-se em consideração o nível de complexidade dos projetos executivos.

Para todos os traços analisados, a resistência aumenta com o tempo, com incrementos de 27,30%, 22,88%, 35,02% e 22,75%, respectivamente, para as combinações de argamassa de referência e as argamassas com substituições de 5%, 10% e 15% de cimento Portland por CBC.

Ao se comparar os valores encontrados para a resistência à compressão, nota-se que o aumento da resistência das idades de 7 dias para 28 dias ocorreu dentro de parâmetros justificados por ter sido utilizado no experimento o cimento Portland de alta resistência inicial (CPV-ARI), que tem a peculiaridade de atingir altas resistências já nos primeiros dias da aplicação.

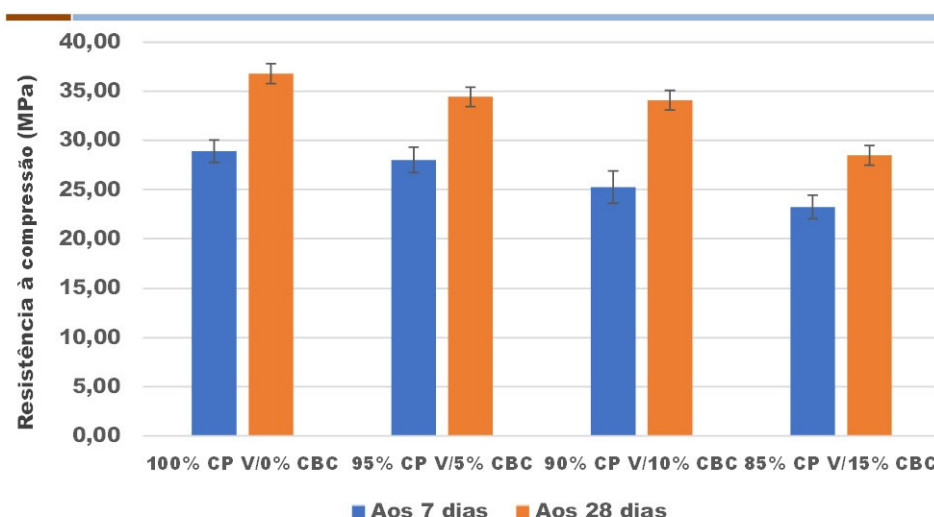


Figura 4. Resistência à compressão axial média das argamassas aos 7 e 28 dias de idade.

4. CONCLUSÕES

As principais contribuições deste trabalho estão relacionadas à potencialização do uso de cinza de bagaço da cana-de-açúcar (CBC) como material pozolânico e sua atuação nas propriedades e aplicabilidade em sistemas cimentícios. Com base nos resultados de caracterização química, é possível concluir que as CBCs estudadas se apresentam como matéria-prima com potencial para a produção de pozolanas.

A CBC in natura, coletada e submetida aos processos de secagem e peneiramento, apresenta somatório dos óxidos de SiO_2 , Al_2O_3 e Fe_2O_3 de 56,18% e valor do IAP com cal de 4,9 MPa, podendo ser um indicativo de torná-la menos reativa e, consequentemente, com baixa atividade pozolânica.

A CBC beneficiada, cominuída em moinho de bolas (com redução do tamanho dos grãos e, consequentemente, aumento da homogeneidade) e produzida com requeima controlada em dois ciclos de 300 e 600 °C em forno tipo mufla (calcinação para eliminação do carbono presente e transformação de fase de inerte para amorfa), registra um somatório de óxidos de silício (SiO_2), alumínio (Al_2O_3) e ferro (Fe_2O_3) de 72,74%, apresentando atividade pozolânica adequada com vistas aos

requisitos propostos na NBR 12653 [16]. A sílica na CBC apresentou-se tanto na fase amorfa quanto nas fases cristalinas de cristobalita e quartzo. Pode-se concluir que a elevada atividade pozzolânica potencialmente registrada pode ser atribuída à presença de sílica amorfa, à baixa perda ao fogo e ao reduzido tamanho de partículas.

Os resultados dos ensaios mecânicos de compressão axial aos 7 e 28 dias de cura dos corpos-de-prova das argamassas indicaram a viabilidade de substituição de 5, 10 e 15% de cimento CP V ARI MAX por equivalente da massa de CBC, visto que os níveis de resistência apresentados não trazem sérios comprometimentos em relação à argamassa de cimento convencional, devendo ser respeitadas as limitações relativas ao nível de complexidade dos projetos executivos.

Diante do exposto, a CBC estudada pode ser considerada um material alternativo para a produção de compósitos cimentícios, cuja possibilidade de utilização traz vantagens econômicas e benefícios relacionados à redução dos impactos ambientais advindos da liberação de CO₂ quando da produção de cimento, bem como, da destinação inadequada dos resíduos junto ao meio ambiente.

REFERÊNCIAS

- [1] Ortega S G, 2014. Organização e sustentabilidade. Sustentabilidade na construção civil: significados, práticas e ideologia. Londrina: 2, 1, 112-137.
- [2] Canova J A, Miotto J L, De Mori L M, 2015. Avaliação de argamassa mista de revestimento com substituição da areia natural por cinza de bagaço de cana-de-açúcar. *Ciência & Engenharia* 24, (1), 125-134.
- [3] Bernardes A, Thomé A, Prietto P D M, Abreu Á G, 2008. Quantificação e classificação dos resíduos da construção e demolição coletados no Município de Passo Fundo, RS. *Ambiente Construído* 8, 3, 65-76.
- [4] U.S. Geological Survey, 2022. Mineral commodity summaries 2022: U.S. Geological Survey, 2022p. <https://doi.org/10.3133/mcs2022>.
- [5] Goldemberg J, 2022. Especialistas discutem papel da indústria do cimento nas emissões de CO₂. Agência FAPESP. <https://agencia.fapesp.br/especialistas-discutem-papel-da-industria-do-cimento-nas-emissoes-de-co2/23449/>
- [6] Savastano J R, Warden P G, 2003. Special theme issue: Natural fibre reinforced cement composites. *Cement & Concrete Composites* 25, 5, 517-624.
- [7] CONAB, 2022. Boletim da cana-de-açúcar: Safra 2021/22. Companhia Nacional de Abastecimento. <https://www.conab.gov.br/info-agro/safras/cana/boletim-da-safra-de-cana-de-acucar>
- [8] Cortez L, Magalhães P, Happ J, 1992. Principais subprodutos da agroindústria canavieira e sua valorização. *Revista Brasileira de Energia* 2, 2, 12-18.
- [9] Maués J A, 2007. Maximização da geração elétrica a partir do bagaço e palha em usina de açúcar e álcool. *Revista Engenharia* 583, 88-95.
- [10] Sales A, Lima S A, 2010. Use of Brazilian sugarcane bagasse ash in concrete as sand replacement. *Waste Management* 30, 6, 1114-1122.
- [11] Cordeiro G C, Toledo Filho R D, Tavares L M, Fairbairn E M R, 2008. Pozzolanic activity and filler effect of sugar cane bagasse ash in Portland cement and lime mortars. *Cement and Concrete Composites* 30, 5, 410-418.
- [12] Cordeiro G C, Toledo Filho R D, Fairbairn E M R, 2009. Caracterização de cinza do bagaço de cana-de-açúcar para emprego como pozzolana em materiais cimentícios. *Química Nova* 32, 1.
- [13] NBR 5751, 2012. Materiais pozzolânicos. Determinação de atividade pozzolânica com cal. Índice de atividade pozzolânica com cal. Método de ensaio. Rio de Janeiro: Associação Brasileira de Normas Técnicas.
- [14] NBR 7215, 1997. Cimento Portland. Determinação da resistência à compressão. Método de ensaio. Rio de Janeiro: Associação Brasileira de Normas Técnicas.
- [15] NBR NM 18, 2012. Cimento Portland. Análise química. Determinação de perda ao fogo. Rio de Janeiro: Associação Brasileira de Normas Técnicas.
- [16] NBR 12653, 2012. Materiais pozzolânicos. Especificação. Rio de Janeiro: Associação Brasileira de Normas Técnicas.
- [17] Villar-Cociña E, Valencia-Morales E, Gonzales-Rodriguez R, Hernandez Ruiz J, 2003. Kinetics of the pozzolanic reaction between lime and sugar cane straw ash by electrical conductivity measurement: A kinetic-diffusive model. *Cement and Concrete Research* 33, 517-524.
- [18] Xu Q, Ji T, Gao S J, Yang Z, Wu N, 2019. Characteristics and applications of sugar cane bagasse ash waste in cementitious materials. *Materials* 12, 1, 39.
- [19] De Paula M O, Tinôco I F F, Rodrigues C S, Da Silva E N, Souza C F, 2009. Potencial da cinza do bagaço da cana-de-açúcar como material de substituição parcial de cimento Portland. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental* 13, 3, 353-357.