



INFLUÊNCIA DA CINZA DE BAGAÇO DE CANA-DE-AÇÚCAR E CURA EM AUTOCLAVE NAS PROPRIEDADES DE COMPOSTOS CIMENTÍCIOS

Aguiar, M. B. de^a; Torres, A. de J. ^b; Silva, P. M. D. ^c; Garcia, D. C. S. ^d

^a Universidade Federal de Minas Gerais - UFMG, Departamento de Engenharia de Materiais e Construção. E-mail: mateus.bravoaguiar@gmail.com

^b Universidade Federal de Minas Gerais - UFMG, Departamento de Engenharia de Materiais e Construção. E-mail: anderdejesustorres@gmail.com

^c Universidade Federal de Minas Gerais - UFMG, Departamento de Engenharia de Materiais e Construção. E-mail: pmarcal9803@gmail.com

^d Universidade Federal de Minas Gerais - UFMG, Departamento de Engenharia de Materiais e Construção. Av. Antônio Carlos, 6627, Belo Horizonte, MG, Brasil. E-mail: dayanacsgarcia@ufmg.br

RESUMO

O Brasil é o maior produtor de cana-de-açúcar do mundo, gerando grande quantidade de resíduos agroindústrias. O objetivo deste trabalho é avaliar a influência da cinza de bagaço de cana-de-açúcar no desempenho de amostras submetidas a cura em autoclave. Argamassas foram moldadas com traço de 1:3:0,5 (cimento: areia: água) e com teores de substituição do cimento por 0%, 10%, 20% e 30% de cinza de bagaço de cana-de-açúcar. As amostras foram enviadas para cura na temperatura ambiente ou cura em autoclave (220°C, pressão de 2,1 MPa, por 8 horas). Foram avaliadas a resistência à compressão, porosidade, absorção de água e a microestrutura. Os resultados mostraram que a cinza de bagaço de cana-de-açúcar reagiu com hidróxido de cálcio e formou mais silicato de cálcio hidratado na cura em autoclave. No entanto, o teor utilizado não foi suficiente para evitar o retrocesso da resistência mecânica e aumento da porosidade da matriz cimentícia.

Palavras chaves: microestrutura, materiais cimentícios, hidratação do cimento Portland, curas especiais.

1 INTRODUÇÃO

Os materiais cimentícios são utilizados para a produção de concretos e argamassas, sendo um dos produtos mais consumidos no mundo. No entanto, eles também são responsáveis por emissão de grandes quantidades de CO₂, consumo de alta quantidade de energia e utilização de recursos naturais não renováveis (1). Sob uma perspectiva sustentável, existem alternativas que podem reduzir esses impactos ambientais, como por exemplo, a substituição do cimento por materiais cimentícios suplementares (2,3). Nesse contexto, a cinza de bagaço de cana de açúcar (CBCA) se mostra favorável, uma vez que o Brasil é o maior produtor de cana de açúcar do mundo (4).

Os materiais cimentícios suplementares são responsáveis por melhorar as propriedades de concretos e argamassas como a trabalhabilidade, resistência mecânica e durabilidade (5). Dentre dos materiais cimentícios suplementares, pode-se citar as pozolanas, que são materiais que reagem com o hidróxido de cálcio, proveniente da hidratação do cimento Portland, e formam mais silicato de cálcio hidratado (C-S-H). O C-S-H é o principal responsável pela resistência mecânica e durabilidade de materiais cimentícios (6).

Várias pesquisas na literatura já mostraram a viabilidade de utilização da CBCA como um material pozolânico (7,8). Isso, pois, ela é composta predominantemente por sílica (SiO₂), alumina (Al₂O₃) e óxido de ferro (Fe₂O₃) (4). Contudo, para ela ser reativa, a CBCA precisa apresentar alto teor de sílica amorfa. A sílica cristalina, como o quartzo, é considerada como uma impureza e compromete a atividade pozolânica da CBCA (9). Contudo, a presença de quartzo é comum, devido a contaminação da cana-de-açúcar pelo solo (10,11). Uma alternativa para utilizar a CBCA rica em quartzo como um material cimentício suplementar é por meio da cura em autoclave. Isso, pois, o quartzo fino pode se tornar reativo devido a pressão e temperatura mais altas (12). Assim sendo, o objetivo deste trabalho é avaliar a influência de diferentes teores de CBCA no desempenho de argamassas submetidas a cura em autoclave.

2 MATERIAIS

2.1 Materiais

Na presente pesquisa foram utilizados os seguintes materiais: Cimento Portland tipo CP-V, cinza de bagaço de cana-de-açúcar, areia normatizada do IPT e aditivo superplastificante à base de policarboxilato. Os resíduos de cana-de-açúcar foram obtidos na indústria sucroalcooleira Raízen, na Cidade de Lagoa da Prata-MG.

Para reduzir a quantidade de matéria orgânica do resíduo, foi realizada a queima da cinza de bagaço de cana-de-açúcar coletada. O procedimento ocorreu em um forno a 600°C, durante um período de 3 horas, com aquecimento a uma taxa de 10°C por segundo e subsequente resfriamento ao ar, conforme pode ser observado na Figura 1. Esta abordagem metodológica seguiu os parâmetros adotados por Soares (2010) (13).

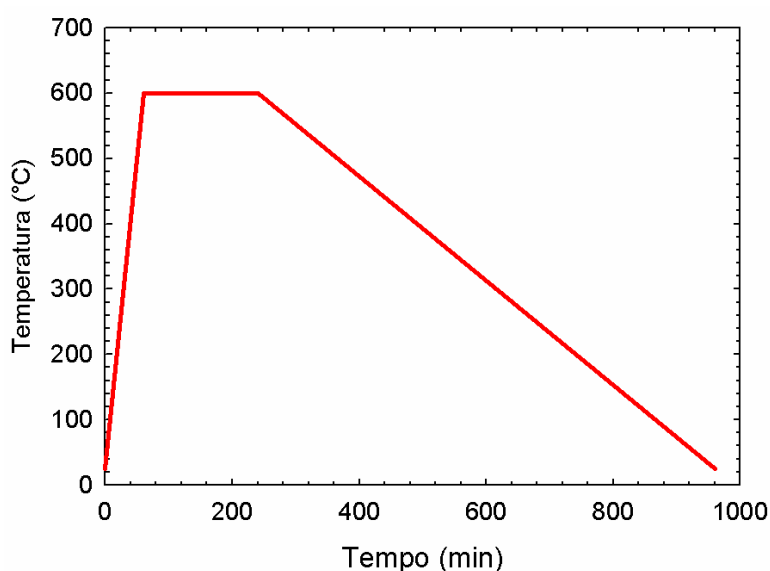


Figura 1 – Condições de queima do resíduo de bagaço de cana-de-açúcar

Na Tabela 1 está apresentada a composição química do cimento Portland e da cinza de bagaço de cana-de-açúcar utilizados. É possível observar que o cimento é composto predominantemente por CaO e SiO₂, seguido de Al₂O₃ e Fe₂O₃, como esperado. Com relação a CBCA, esta apresenta SiO₂, Al₂O₃ e Fe₂O₃ como óxidos majoritários. É possível observar a presença de fases cristalinas da CBCA no difratograma da Figura 2, principalmente o quartzo.

Tabela 1 – Composição química (%) do cimento Portland e da CBCA

Material	CaO	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	TiO ₂	P ₂ O ₅	K ₂ O	MgO
Cimento	56,47	24,59	7,19	4,05	0,25	0,12	-	2,43
CBCA	3,83	53,77	18,71	14,99	1,86	1,31	4,93	-

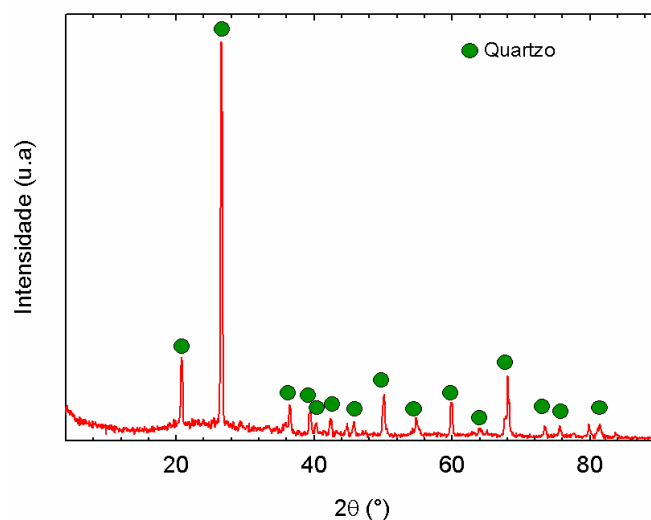


Figura 2 – Difratograma da cinza de bagaço de cana-de-açúcar após a queima

2.2 Métodos

Foram moldadas argamassas com o traço 1:3:0,5 (cimento CPV: areia: água) e com teores de substituição do cimento por 0%, 10%, 20% e 30% de cinza de bagaço de cana-de-açúcar. O traço foi determinado conforme especificações para a argamassa padrão da norma NBR 7215/19 (14). Apesar da relação água/cimento estipulada ser 0,48, decidiu-se arredondar o valor para 0,5. As proporções das misturas estão apresentadas na Tabela 2. O teor de aditivo foi determinado para se obter abatimento em *flow table* de 220 ± 20 mm.

Tabela 2 – Quantidade de materiais (kg/m³) para cada uma das amostras

Amostra	Materiais (kg/m ³)				
	Cimento	CBCA	Areia	Água	Aditivo*
REF	513	0	1539	256	0,25
10% CBCA	509	51	1528	255	0,5
20% CBCA	506	101	1517	253	0,75
30% CBCA	502	151	1507	251	1,0
*% em massa de aglomerante (cimento + CBCA)					

Para a moldagem das amostras, primeiramente, os materiais secos foram misturados por três minutos, e depois acrescentado a metade do volume da água, e os materiais foram misturados por mais um minuto. Logo em seguida, a restante da água com aditivo superplastificante foi adicionada até se obter a consistência de 220 ± 20 mm. Os corpos de prova foram moldados em moldes cúbicos de 40 mm de aresta. Após 24 horas, as amostras foram desmoldadas e levadas para a cura normal ou em autoclave. A cura normal foi realizada com a imersão dos corpos de prova em solução saturada de hidróxido de cálcio. A cura em autoclave foi realizada na temperatura de 220°C , com pressão de 2,1 atm por 8 horas. Posteriormente as amostras foram mantidas em solução saturada de hidróxido de cálcio até 28 dias.

Após o período de cura, foram determinadas a resistência à compressão e a porosidade das amostras. As amostras passaram pelo teste de resistência à compressão com a média de seis amostras, a qual foram comprimidas axialmente até a sua ruptura conforme a NBR 7215/19 (14). O teste da porosidade consiste na análise dos poros das amostras. Para isso, foi determinado pela absorção por imersão, conforme prescrita na NBR 9778/2005 (15), a qual se fez a análise das massas seca, úmida e submersa.

Foi realizada difração de raios-X (DRX) para analisar os produtos cristalinos formados da hidratação do cimento. A DRX foi realizada em amostras em pó, no equipamento PANalytical Empyrean com radiação $\text{CuK}\alpha$ de ($k = 1,5406 \text{ \AA}$), com 2θ variando de $3,03^{\circ}$ até 50° , a cada 0.06° por 3 segundos. As diferentes fases foram identificadas utilizando o banco de dados do ICDD.

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1 Resistência à compressão

Na Figura 3 são apresentadas a média das resistência à compressão de seis corpos de prova para cada condição. Nas amostras com cura à temperatura ambiente, observa-se resistência à compressão em torno de 50 MPa para a amostra referência, ao passo que, as amostras com CBCA apresentam valores em torno de 40 MPa. Isso mostra uma redução de aproximadamente 20% devido ao emprego da CBCA. Isso pode ter acontecido, pois, diferentes teores de material cimentício foi substituído por um material não reativo (16). Contudo, não foram observadas alterações da

resistência à compressão entre os diferentes teores de CBCA utilizado, mostrando que, o teor de 30% de CBCA pode ter melhorado o empacotamento das pastas de cimento. Com relação a cura em autoclave, observa-se queda de aproximadamente 20% da resistência à compressão em todas condições, exceto para a amostra com utilização de 20% de CBCA, cuja queda foi maior.

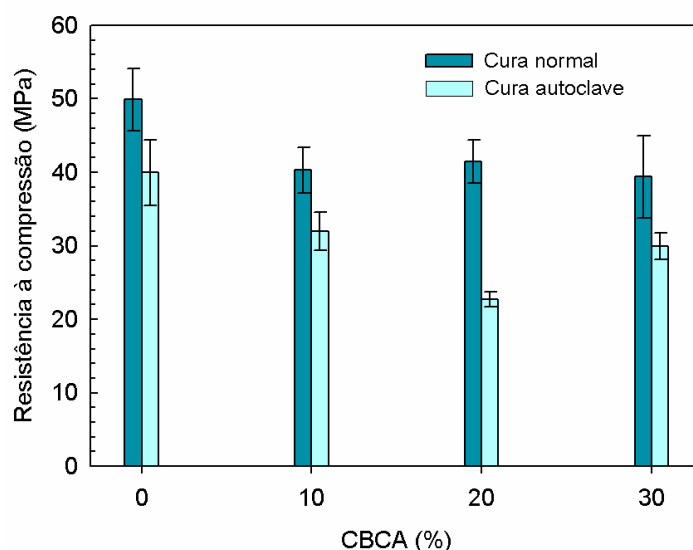


Figura 3 – Resistência à compressão das amostras

3.2 Porosidade e absorção de água

Nas Figura 4 e Figura 5 estão apresentados os valores de porosidade e absorção de água das amostras, respectivamente. É possível observar aumento expressivo da porosidade, aproximadamente 3 vezes, devido a cura em autoclave em comparação com as amostras com cura normal. Além disso, comparando as médias e os desvio padrões, observa-se que a porosidade foi praticamente a mesma em todas as condições com cura em autoclave, apresentando uma tendência de redução nas amostras com CBCA. A mesma tendência foi observada nos resultados de absorção de água.

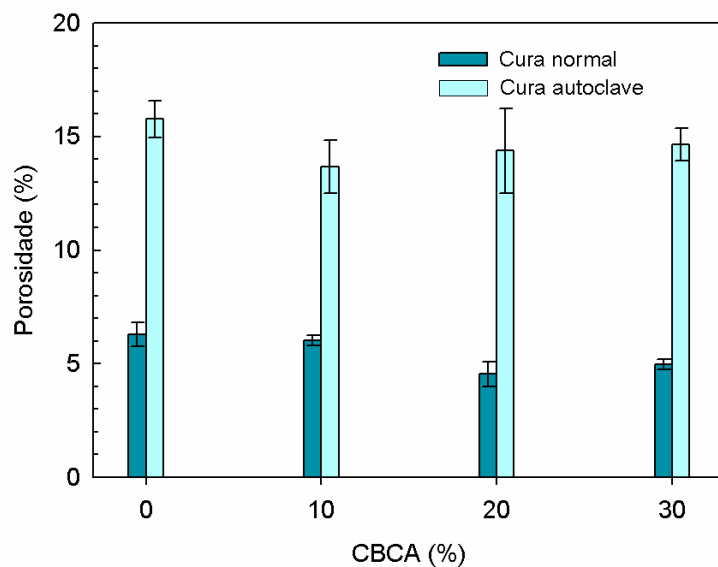


Figura 4 – Porosidade das amostras

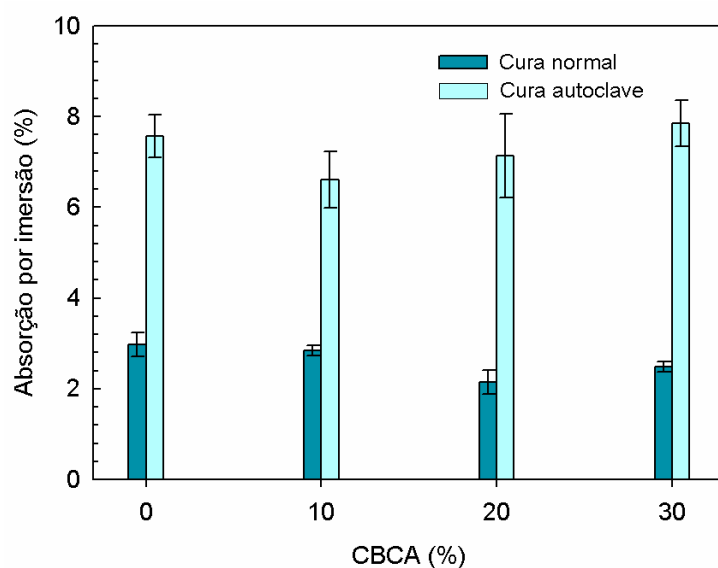


Figura 5 – Absorção por imersão das amostras

De acordo com os resultados, é possível observar que quanto maior a taxa de absorção, maior é a porosidade. Entretanto, a absorção d'água é afetada pela estrutura dos poros, sua distribuição e interconexão. Com isso, mesmo que uma amostra tenha maior porosidade, a sua absorção d'água pode ser menor se os poros forem menos efetivos na retenção de água devido à sua estrutura ou tipo.

3.3 Difração de raios-X

Na Figura 6 estão apresentados os difratogramas das amostras com (a) cura normal e (b) cura em autoclave. Para avaliar apenas a influência da CBCA na matriz cimentícia, as amostras para DRX foram apenas pastas de cimento, excluindo a utilização da areia. Isso foi feito, pois, como a argamassa possui traço de 1:3 (cimento: areia), os picos de quartzo da areia iriam se sobressair.

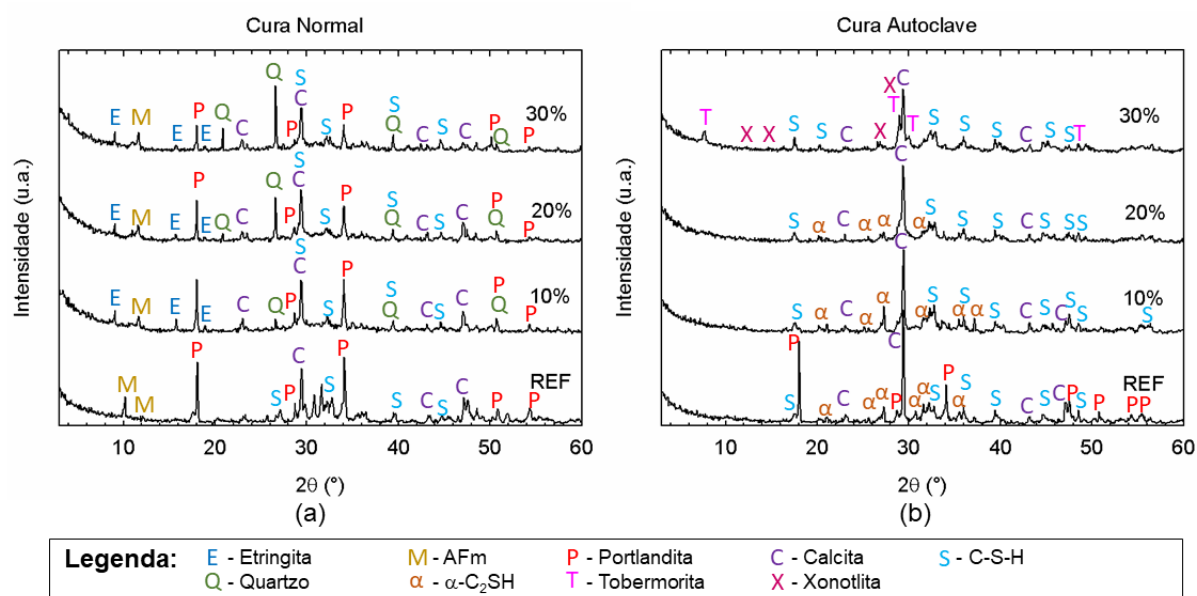


Figura 6 – Difratograma das amostras com (a) cura normal e (b) cura em autoclave

Nas amostras com cura normal (Figura 6 (a)), observa-se queda gradual dos picos característicos do hidróxido de cálcio (Portlandita), $2\theta \sim 18,08^\circ$ e $34,11^\circ$, com o aumento do teor de CBCA. Isso pode ser explicado devido a redução da quantidade de cimento, uma vez que o hidróxido de cálcio é um produto de hidratação. Ao mesmo tempo, observa-se a presença de picos característicos de quartzo nas amostras com cinza. A presença de sílica cristalina na CBCA ocorre devido a contaminação pelo solo (4). Os produtos de hidratação do cimento, etringita, monossulfato de cálcio hidratado e silicato de cálcio hidratado e a calcita foram observados em todas as amostras.

Com relação a amostras com cura em autoclave (Figura 6 (b)), é possível observar aumento dos produtos de hidratação e redução do cimento anidro. Isso acontece, pois, a cura em autoclave acelera o processo de hidratação do cimento e as reações pozolânicas (17,18). A presença do pico de hidróxido de cálcio não foi observada nas amostras com cinza, devido à ausência do pico característico. Além disso, nota-se ausência de picos de quartzo nas amostras com CBCA. Isso indica que

a sílica presente a CBCA está reagindo com o hidróxido de cálcio e formando mais C-S-H, devido a cura em autoclave (12). Em outras palavras, está acontecendo a reação pozolânica.

É possível observar a presença de α -C₂SH em todas as amostras, exceto a amostra com 30% de CBCA, justamente a amostra com maior teor de CBCA e formação de cristais de tobermorita e xonotlita. Essas três fases só são formadas em materiais cimentícios submetidas a curas térmicas. A fase α -C₂SH é uma fase rica em Ca, sendo responsável por deixar a matriz cimentícia mais porosa e consequentemente com menor resistência mecânica (19).

Por outro lado, as fases tobermorita e xonotlita são cristais de silicato de cálcio hidratado com baixa relação Ca/Si, com valores de 0,83 e 1,0, respectivamente (20). Essas fases só são formadas com a utilização de uma fonte rica em silício, uma vez que o cimento tem mais cálcio (21). Além disso, a formação delas é considerada vantajosa, pois geralmente elas crescem em poros, densificando a microestrutura e aumentando a resistência mecânica de materiais cimentícios (22).

Embora foi observado um melhor desempenho da matriz cimentícia com utilização de 25% de CBCA como substituição do cimento no trabalho de (23), o teor de 30% de CBCA utilizado neste trabalho ainda não é suficiente para evitar o retrocesso da resistência mecânica e aumento da porosidade devido ao tratamento em autoclave. Assim, novos estudos precisam ser realizados com teores maior de SCBA e menor relação água/cimento para verificar a possibilidade de utilizar esse resíduo em materiais cimentícios submetidos a cura em autoclave.

4 CONCLUSÃO

Foram moldadas argamassas com substituição parcial da massa de cimento Portland por 0%, 10%, 20% e 30% por cinza de bagaço de cana-de-açúcar. As amostras foram submetidas a cura em temperatura ambiente e cura em autoclave. Foram avaliadas a resistência à compressão, porosidade, absorção de água e fases cristalinas formadas. A partir dos resultados, as seguintes conclusões foram obtidas:

- Cinzas de bagaço de cana-de-açúcar com alto teor de sílica cristalina não são adequadas para serem utilizadas como material pozolânico na temperatura ambiente. Contudo, com cura em autoclave, o quartzo reage com o hidróxido de cálcio e forma mais silicato de cálcio hidratado.

- Os teores de 10% e 20% não foram suficientes para evitar a formação da fase α -C₂SH, que é uma fase rica em cálcio. Consequentemente houve queda da resistência mecânica e aumento da porosidade.
- O teor de 30% de substituição do cimento Portland por CBCA foi suficiente para evitar formação de α -C₂SH e permitir a formação de tobermorita e xonotlita. Mesmo assim, esse teor de CBCA não foi suficiente para evitar o retrocesso da resistência mecânica e aumento da porosidade das amostras.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao suporte financeiro do projeto FAPEMIG #APQ – 00786-22, a Capes, CNPq, ao Departamento de Engenharia de Materiais e Construção, ao Centro de Microscopia da UFMG e LCPNano - Laboratório de Caracterização e Processamento da Nanomateriais da UFMG.

REFERÊNCIAS

1. Mehta PK, Monteiro PJ. Concrete: Microstructure, Properties, and Materials. 4th ed. New York: McGraw-Hill Education; 2014.
2. Deja J, Uliasz-Bochenczyk A, Mokrzycki E. CO₂ emissions from Polish cement industry. International Journal of Greenhouse Gas Control. 1º de julho de 2010;4(4):583–8.
3. Ali MB, Saidur R, Hossain MS. A review on emission analysis in cement industries. Renewable and Sustainable Energy Reviews. junho de 2011;15(5):2252–61.
4. Thomas BS, Yang J, Bahurudeen A, Abdalla JA, Hawileh RA, Hamada HM, et al. Sugarcane bagasse ash as supplementary cementitious material in concrete – a review. Materials Today Sustainability. novembro de 2021;15:100086.
5. Lothenbach B, Scrivener K, Hooton RD. Supplementary cementitious materials. Cem Concr Res [Internet]. dezembro de 2011;41(12):1244–56. Disponível em: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0008884610002632>
6. Neville AM. Properties of Concrete. 5th ed. San Francisco: Prentice Hall; 2012. 846 p.
7. Ganesan K, Rajagopal K, Thangavel K. Evaluation of bagasse ash as supplementary cementitious material. Cem Concr Compos. julho de 2007;29(6):515–24.

8. Cordeiro GC, Toledo Filho RD, Tavares LM, Fairbairn EMR. Pozzolanic activity and filler effect of sugar cane bagasse ash in Portland cement and lime mortars. *Cem Concr Compos* [Internet]. maio de 2008;30(5):410–8. Disponível em: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0958946508000036>
9. Soares MMN de S, Figueiredo RB, Aguilar MTP, Cetlin PR. Evaluation of Pozzolanic Activity of Siliceous Materials Using the Method of Variation of Conductivity in Lime Solution. *Materials Science Forum*. junho de 2014;798–799:363–8.
10. Cordeiro GC, Toledo Filho RD, Tavares LM, Fairbairn E de MR. Ultrafine grinding of sugar cane bagasse ash for application as pozzolanic admixture in concrete. *Cem Concr Res*. fevereiro de 2009;39(2):110–5.
11. Pereira A, Akasaki JL, Melges JLP, Tashima MM, Soriano L, Borrachero M V., et al. Mechanical and durability properties of alkali-activated mortar based on sugarcane bagasse ash and blast furnace slag. *Ceram Int*. dezembro de 2015;41(10):13012–24.
12. Garcia DCS, Wang K, Figueiredo RB. The influences of quartz content and water-to-binder ratio on the microstructure and hardness of autoclaved Portland cement pastes. *Cem Concr Compos*. agosto de 2018;91:138–47.
13. Soares MMN de S. Influência das condições de queima nas características físico-químicas das cinzas do bagaço de cana-de-açúcar [Mestrado]. [Belo Horizonte]: Universidade Federal de Minas Gerais - UFMG; 2010.
14. Associação Brasileira de Normas Técnicas. ABNT. NBR 7215 Cimento Portland - Determinação da resistência à compressão. 2019. p. 1–12.
15. Associação Brasileira de Normas Técnicas. ABNT. NBR 9778 Argamassa e concreto endurecidos - Determinação da absorção de água, índice de vazios e massa específica. 2005. p. 1–4.
16. Jagadesh P, Ramachandramurthy A, Rajasulochana P, Hasan MA, Murugesan R, Khan AH, et al. Effect of processed sugarcane bagasse ash on compressive strength of blended mortar and assessments using statistical modelling. *Case Studies in Construction Materials*. dezembro de 2023;19:e02435.
17. Xu D, Tang J, Hu X, Yu C, Han F, Sun S, et al. The influence of curing regimes on hydration, microstructure and compressive strength of ultra-high performance concrete: A review. *Journal of Building Engineering*. outubro de 2023;76:107401.
18. Luke K. Phase studies of pozzolanic stabilized calcium silicate hydrates at 180 °C. *Cem Concr Res*. setembro de 2004;34(9):1725–32.
19. Hong SY, Glasser FP. Phase relations in the CaO–SiO₂–H₂O system to 200 °C at saturated steam pressure. *Cem Concr Res*. setembro de 2004;34(9):1529–34.

20. Richardson IG. The calcium silicate hydrates. *Cem Concr Res.* fevereiro de 2008;38(2):137–58.
21. Yazıcı H, Deniz E, Baradan B. The effect of autoclave pressure, temperature and duration time on mechanical properties of reactive powder concrete. *Constr Build Mater.* maio de 2013;42:53–63.
22. Tam C ming, Tam VW yan. Microstructural behaviour of reactive powder concrete under different heating regimes. *Magazine of Concrete Research.* março de 2012;64(3):259–67.
23. Torres A de J, Brasil MJR, Aguiar MB de A, Barbosa MTG, Santos WJ dos, Garcia DCS. Microestrutura de pastas de cimento com cinza de bagaço de cana-de-açúcar e tratamento em autoclave. Em: *Encontro Nacional de Aproveitamento de Resíduos na Construção: Circularidade e sustentabilidade.* Foz do Iguaçu; 2023. p. 1–6.

INFLUENCE OF SUGARCANE BAGASSE ASH AND AUTOCLAVE CURING ON THE PROPERTIES OF CEMENTITIOUS COMPOSITES

ABSTRACT

Brazil is the world's largest producer of sugarcane, generating a significant amount of agro-industrial waste. The aim of this study is to evaluate the influence of sugarcane bagasse ash on the performance of samples subjected to autoclave curing. Mortars were prepared with a mix ratio of 1:3:0.5 (cement: sand: water) and with cement replacement levels of 0%, 10%, 20%, and 30% by sugarcane bagasse ash. The samples were subjected to curing at room temperature or autoclave curing (220°C, 2.1 MPa pressure, for 8 hours). Compressive strength, porosity, water absorption, and microstructure were evaluated. The results showed that the sugarcane bagasse ash reacted with calcium hydroxide and formed more calcium silicate hydrate during autoclave curing. However, the amount used was not sufficient to prevent the regression of mechanical strength and the increase in porosity of the cementitious matrix.

Keywords: microstructure, cementitious materials, Portland cement hydration, special curing.