

SUBMETIDO 03/12/2021

APROVADO 23/03/2022

PUBLICADO ON-LINE 15/04/2022

PUBLICADO 10/07/2023

EDITORES ASSOCIADOS

Mariana Amorim Fraga e
Hugo Plínio de Andrade Alves

DOI: <http://dx.doi.org/10.18265/1517-0306a2021id6535>

ARTIGO ORIGINAL

Caracterização e aplicação da cinza do bagaço da cana-de-açúcar em misturas de concreto seco

 Cristóvão José Diniz Feitosa ^[1]

 Victor Marcelo Estolano de Lima ^{[2]*}

 John Kléber Fabrício da Silva ^[3]

 Artur Vinícius Matias ^[4]

 Amanda Marques Lopes Estolano ^[5]

 Antonio Acacio de Melo Neto ^[6]

[1] cjdiniz22@gmail.com

[2] victor.estolano@ufpe.br

[3] jk15@hotmail.com

[4] artur_matias@yahoo.com.br

[6] antonio.meloneto@ufpe.br

Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade Federal de Pernambuco (UFPE), Brasil

[5] amanda.estolano@ufpe.br

Instituto Nacional de Tecnologia em União e Revestimento de Materiais (INTM), Universidade Federal de Pernambuco (UFPE), Brasil

*Autor para correspondência.

RESUMO: Este trabalho tem o objetivo de analisar a influência da incorporação da cinza do bagaço da cana-de-açúcar na resistência à compressão de misturas secas de concreto, visando sua utilização em pavimentos intertravados. A caracterização física e química da cinza foi feita por meio de ensaios de massa específica e finura Blaine, fluorescência e difração de raios X, granulometria a laser e microscopia eletrônica de varredura. Foram moldadas misturas secas de concreto, partindo de um traço de referência utilizado por uma fábrica de artefatos de concreto. As substituições variaram de 5% a 50% em massa, tanto no cimento como na areia. Os ensaios de resistência à compressão mostraram um aumento na resistência aos 7 dias, em substituições de até 20% no cimento. Aos 28 dias, entretanto, todas as misturas com cinza apresentaram resistência à compressão inferior ao traço de referência. Concluiu-se que o efeito físico causado pela alta finura da cinza pode ter melhorado o empacotamento no início, mas sua baixa pozolanicidade resultou num menor crescimento da resistência à compressão aos 28 dias.

Palavras-chave: cinza do bagaço da cana-de-açúcar; concreto seco; pavimento intertravado; resistência à compressão.

Characterization and application of sugarcane bagasse ash in no-slump concrete mixtures

ABSTRACT: This paper analyzes the influence of the incorporation of sugarcane bagasse ash on the compressive strength of no-slump concrete mixtures, aiming at their use in interlocking pavement blocks. Chemical and physical characterization of the ash was conducted by using such tests asf specific gravity, Blaine fineness, X-ray diffraction and fluorescence, laser granulometry, and scanning electronic microscopy. No-slump concrete mixtures were designed from a reference mixture used by a concrete artifact factory. The substitutions

varied from 5% to 50% by mass, both in the cement and in the fine aggregate. Increases in compressive strength of cement were observed at 7 days in replacements of up to 20%. At 28 days, however, all ash mixtures showed lower compressive strength than the reference mixture. The physical effect caused by the high fineness of the ash may have improved the initial packing, but its low pozzolanicity resulted in lower growth of the compressive strength at 28 days.

Keywords: compressive strength; interlock pavement; no-slump concrete; sugarcane bagasse ash.

1 Introdução

A preocupação da sociedade com questões ambientais, como o efeito estufa e a poluição do ar, tem aumentado na comunidade científica o interesse em pesquisas com o objetivo de diminuir a emissão de gases poluentes oriundos dos diversos setores da economia. A indústria da construção civil, nesse contexto, se insere como uma das protagonistas, devido à alta demanda por materiais poluentes como o aço e o cimento. O cimento é conhecidamente um dos materiais mais poluentes do mundo, sendo responsável pela emissão de 8% do CO₂ gerado em todo o mundo (ANDREW, 2018).

Nesse cenário, os pesquisadores da área de materiais de construção vêm estudando a viabilidade da incorporação de resíduos oriundos de diversas atividades – tais como demolição, agroindústria, indústria siderúrgica, estações de tratamento de água e esgoto, entre outras – nos produtos à base de cimento Portland, como substituição parcial ao cimento, como filer ou pozolana, ou como substituição ao agregado. As vantagens decorridas da substituição de cimento por resíduo são a diminuição da emissão de CO₂ e a utilização do resíduo, o qual, de outro modo, poderia ser destinado ilegalmente, causando prejuízos financeiros, sociais e ambientais para a sociedade.

Um dos resíduos que vem sendo estudado para essas finalidades é a cinza do bagaço da cana (CBCA). Essa cinza é oriunda da queima do bagaço da cana-de-açúcar para geração de energia para a usina. Após a queima do bagaço, a cinza é conduzida por dutos até chegar a pequenos canais, que a transportam para uma lagoa de decantação. Parte dela é reutilizada como fertilizante no solo (BEGA, 2014), entretanto seu uso, nessa finalidade, é limitado, tendo que ser então depositada em algum local da usina. Dessa forma, é relevante estudar como a cinza do bagaço pode ser inserida na produção de cimentos, argamassas e concretos.

Um importante tipo de produto cimentício é o concreto seco, o qual se usa para fabricar blocos para pavimentação, lajes alveolares extrudadas e blocos para alvenaria. Existem estudos na literatura que avaliam o uso de materiais cimentícios suplementares nesse tipo de concreto. Estolano *et al.* (2021) estudaram os efeitos do uso de metacaulim no concreto seco. No estudo, observou-se uma substituição ótima na faixa de 10%, a qual aumentou significativamente a resistência à compressão dos blocos intertravados para pavimentação (*pavers*). Lincy e Velkennedy (2021) estudaram a substituição parcial do cimento por metacaulim em blocos de concreto geopolimérico para pavimentação; eles concluíram que o teor de 30% combinado com 1% de nanossílica melhora a resistência e durabilidade do produto. Focando o emprego da cinza do bagaço, Rajkumar *et al.* (2016) estudaram a substituição de 50%

de cimento por CBCA e encontraram uma manutenção da resistência à compressão em relação ao concreto sem CBCA.

Apesar de existirem pesquisadores que estudaram o uso de materiais cimentícios suplementares em blocos de pavimentação, existe uma notável lacuna na literatura quando o material estudado é a cinza do bagaço da cana-de-açúcar. Nesse cenário, este trabalho tem como objetivo avaliar a incorporação da CBCA em misturas de concreto seco, utilizadas em *pavers*. Para avaliar o desempenho mecânico das misturas foi realizado o ensaio de resistência à compressão em corpos de prova cilíndricos de 5 cm × 10 cm. Do ponto de vista ambiental, esta pesquisa não realizou nenhum processo de calcinação adicional para eliminar a matéria orgânica residual da cinza, visando diminuir a geração de CO₂. Apenas uma breve moagem foi conduzida até ser obtida uma finura razoável para a aplicação prática.

O restante do artigo é dividido da seguinte forma: na seção 2, é apresentado o referencial teórico, com a metodologia da pesquisa indicada na seção 3. Os resultados e as discussões, bem como as conclusões decorrentes, são apresentados nas seções 4 e 5, respectivamente.

2 Referencial teórico

Nesta seção, são relatados trabalhos anteriores sobre a caracterização da cinza do bagaço da cana-de-açúcar e a moldagem de misturas secas de concreto.

2.1 Cinza do bagaço da cana

A CBCA possui, em sua composição química, um alto teor de sílica, assim como as cinzas de origem vegetal. Preferencialmente, essa sílica deve se apresentar na sua forma amorfa para que o resíduo se viabilize como uma pozolana. No caso da CBCA, entretanto, parte da sílica está na forma de quartzo e cristobalita, minerais que possuem baixa solubilidade (ARIF; CLARK; LAKE, 2017), o que diminui seu potencial pozolânico. O quartzo aparece na cinza devido à contaminação do bagaço com o solo, que ocorre na etapa da lavoura (CORDEIRO *et al.*, 2008); a cristobalita pode ocorrer devido à alta temperatura no interior da caldeira, que pode ultrapassar 800 °C (CORDEIRO; TAVARES; TOLEDO FILHO, 2016). O tempo na caldeira é importante para as propriedades químicas da CBCA, pois, mesmo em altas temperaturas, a cinza que permanece pouco tempo na caldeira pode apresentar um alto teor de matéria orgânica.

Outra propriedade a ser analisada é a finura. Os materiais que são utilizados como filer ou pozolana devem apresentar uma finura, no mínimo, na faixa do cimento. A CBCA, todavia, sai da caldeira com uma granulometria grosseira e com o formato das partículas bastante irregular. Deve-se, então, moer a cinza, atividade que é facilitada pelo fato de as partículas fibrosas não apresentarem resistência à abrasão.

Em concretos convencionais, observa-se que, dependendo do teor de cinza no concreto, pode haver um aumento da resistência à compressão. Cordeiro, Toledo Filho e Fairbairn (2010) encontraram um aumento na resistência à compressão do concreto com 10% de substituição de cimento por CBCA. Moretti *et al.* (2016) observaram um aumento da resistência à compressão do concreto com 30% de CBCA, em relação ao concreto de referência.

2.2 Concreto seco

O concreto seco, utilizado em pavimentos intertravados, lajes pré-moldadas e blocos para alvenaria, possui características totalmente diferentes do concreto convencional. Uma diferença que pode ser imediatamente notada é com relação à consistência, pois o concreto seco tem um aspecto de “farofa” e não se comporta como um fluido. Isso se deve ao teor de pasta, pois, enquanto no concreto convencional esse teor fica em torno de 30%, no concreto seco, ele é menor que 20% (FERNANDES, 2016). Outra diferença se dá na concordância entre a relação água/cimento e a resistência à compressão. O concreto convencional obedece à Lei de Abrams (FRASSON JÚNIOR, 2000; FERNANDES, 2016), segundo a qual quanto maior for a relação água/cimento, menor será a resistência à compressão; ao passo que essa teoria não é obedecida no concreto seco.

O método de produção mais usual e indicado para *pavers* é a vibroprensagem, por possibilitar maior controle tecnológico e alta produtividade (BITTENCOURT, 2012). As máquinas utilizadas nesse processo exercem uma alta energia de compactação no concreto seco. Dessa maneira, a simulação dos traços em laboratório é difícil, pois ainda não existe normalização e os equipamentos para produção em pequena escala, nos quais seriam simulados os esforços reais exercidos pelas máquinas de vibroprensa, não conseguem alcançar a energia de compactação de uma máquina industrial. Na literatura, são encontrados alguns trabalhos em que foram realizadas adaptações na tentativa de simular esses esforços. Frasson Júnior (2000) executou misturas para blocos de alvenaria e moldou corpos de prova cilíndricos com dimensões de 5 cm × 10 cm. Esse autor utilizou um molde tripartido de 5 cm × 13 cm para auxiliar na moldagem, que foi realizada em 4 camadas, com 20 golpes cada e auxílio de um soquete. O mesmo método foi utilizado por Rezende *et al.* (2012) para moldagem de concreto seco. Siqueira, Stramari e Folgueras (2004) moldaram corpos de prova cilíndricos de 15 cm × 30 cm de concreto para blocos de alvenaria, utilizando três camadas que foram compactadas com auxílio do cilindro proctor normal, cada camada com 26 golpes. Lima (2017) utilizou uma mesa vibratória adaptada para moldagem em corpos de prova cilíndricos de 10 cm × 20 cm. A moldagem foi realizada em três camadas, sendo cada uma comprimida por um soquete adaptado durante 60 segundos, enquanto a mesa vibrava. Na referida pesquisa, os traços foram utilizados em lajes pré-moldadas, e a resistência à compressão dos corpos de prova, utilizando esse método de compactação, chegou a uma média de 55 MPa.

3 Método da pesquisa

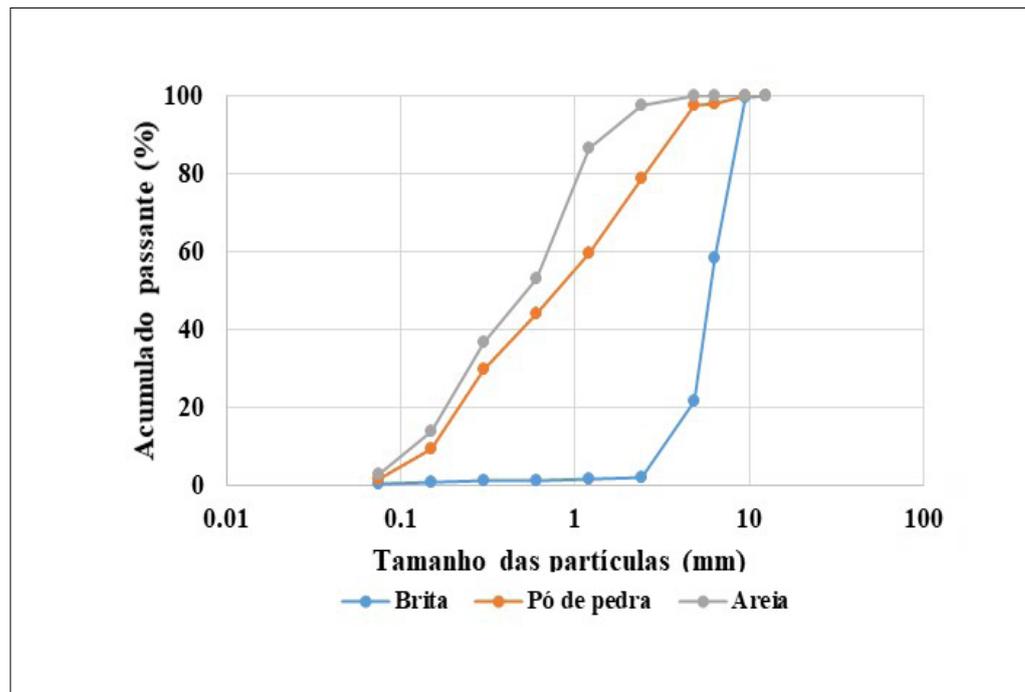
Nesta seção, estão detalhados os métodos utilizados para a caracterização dos materiais e para a dosagem e caracterização mecânica das misturas de concreto.

3.1 Materiais

Para a realização deste estudo, os agregados utilizados foram uma areia quartzosa média, pó de brita e brita de origem granítica de 12,5 mm de dimensão máxima característica. As curvas granulométricas dos materiais se encontram na Figura 1, obtidas pelo ensaio de peneiramento segundo a norma ABNT NBR NM 248/2003 (ABNT, 2003). O cimento utilizado foi do tipo CP II – Z 32.

Figura 1 ▶

Caracterização granulométrica da brita, do pó de pedra e da areia.
Fonte: dados da pesquisa



A CBCA foi coletada em uma usina de cana localizada na cidade de Lagoa do Itaenga, estado de Pernambuco. Por possuir uma granulometria grosseira e irregular, uma moagem foi conduzida até a finura da cinza alcançar aproximadamente 1000 m²/kg no permeabilímetro de Blaine. A CBCA foi utilizada sem passar por nenhum processo adicional de calcinação. Os dados de massa específica e finura Blaine estão expostos na Tabela 1.

Tabela 1 ▶

Dados de massa específica dos materiais utilizados na pesquisa.
Fonte: dados da pesquisa

Material	Areia	Pó de brita	Brita	Cimento	CBCA
Massa específica (g/cm³)	2,63	2,68	2,71	2,95	2,12
Finura Blaine (m²/kg)	-	-	-	475	1000

Além dos ensaios normalizados, a cinza passou por uma caracterização química e física. O ensaio de fluorescência de raios X foi feito para conhecer a composição química da cinza na forma de óxidos, sendo ele conduzido em um espectrômetro da marca Rigaku modelo RIX 3000. Já o ensaio de difração de raios X foi realizado em um difratômetro Bruker D2 Phaser e teve como objetivo identificar as fases mineralógicas da cinza. Por fim, o ensaio de granulometria a laser, conduzido em um equipamento da Malvern Instruments modelo Mastersizer 2000, permitiu obter a distribuição do tamanho de partículas de cinza.

3.2 Métodos

O traço de referência utilizado (REF) foi obtido em uma empresa fabricante de artefatos de concreto, como *pavers* e blocos de concreto para alvenaria, localizada na cidade de Vertente do Lério, estado de Pernambuco. Nas demais misturas,

Tabela 2 ▼

Proporções (traços) e consumos de materiais utilizados nas misturas do programa experimental.

Fonte: dados da pesquisa

foram realizadas substituições parciais pela CBCA, tanto no agregado como no cimento. A percentagem de substituição está apresentada no código da mistura. Nas misturas em que o cimento foi substituído, por exemplo, o código CIMXCY representa uma substituição de Y% de cimento por CBCA. De outro modo, naquelas misturas em que a areia foi substituída, o código AXCY representa que a cinza substituiu a quantidade em massa de areia em Y%. A Tabela 2 indica as proporções das misturas experimentais.

Código	Proporção (cim:a:pb:b:cb:a/c)	Cimento (kg/m ³)	Areia (kg/m ³)	CBCA (kg/m ³)
REF	1:1,23:2,93: 1,44:0:0,42	351,13	432,08	0,00
CIM95C5	0,95 :1,23:2,93:1,44: 0,05 : 0,42	332,80	431,08	17,52
CIM90C10	0,90 :1,23:2,93:1,44: 0,10 : 0,42	314,55	430,08	34,95
CIM80C20	0,80 :1,23:2,93:1,44: 0,20 : 0,42	278,31	428,09	69,58
CIM70C30	0,70 :1,23:2,93:1,44: 0,30 : 0,42	242,40	426,13	103,89
CIM60C40	0,60 :1,23:2,93:1,44: 0,40 : 0,42	206,82	424,18	137,88
CIM50C50	0,50 :1,23:2,93:1,44: 0,50 : 0,42	171,57	422,24	171,57
A90C10	1: 1,11 :2,93: 1,44: 0,12 :0,42	349,75	387,34	43,04
A80C20	1: 0,98 :2,93: 1,44: 0,25 :0,42	348,38	342,96	85,74
A70C30	1: 0,86 :2,93: 1,44: 0,37 :0,42	347,02	298,91	128,11
A50C50	1: 0,62 :2,93: 1,44: 0,62 :0,42	344,33	211,86	211,86

Legenda: cim = cimento; a = areia; pb = pó de brita; b = brita; cb = cinza do bagaço da cana; a/c = relação água/cimento

Os materiais foram misturados em um misturador planetário durante cinco minutos, e então foram moldados em corpos de prova cilíndricos de 5 cm × 10 cm. Como abordado na seção 2, existe uma dificuldade em compactar as misturas secas em condições semelhantes às condições de campo. Entretanto, a padronização do método para todas as misturas pode garantir resultados coerentes, mesmo que a resistência à compressão não seja a mesma dos artefatos moldados pela vibroprensa. Dessa maneira, as misturas foram compactadas em 4 camadas, cada uma com 20 golpes, por meio de um cilindro maciço de metal, de 46 mm de diâmetro, pesando aproximadamente 6 kg. Em cada golpe, o cilindro descia em queda livre a aproximadamente 15 cm da camada a ser compactada. Um tarugo de PVC foi utilizado para evitar que o cilindro tocasse na borda da forma. A desforma foi realizada um dia após a moldagem; depois disso, os corpos de prova ficaram em cura submersa com água até as datas do ensaio de compressão, aos 7 e aos 28 dias. O ensaio de resistência à compressão axial foi realizado segundo a NBR 7215 (ABNT, 1996), e o valor da resistência de cada traço foi obtido pelo cálculo da média da resistência à compressão individual de três corpos de prova.

4 Resultados e discussões

Nesta seção, são discutidas a caracterização da cinza e sua avaliação substituindo o cimento e a areia nas misturas de concreto seco.

4.1 Caracterização da cinza

Nas subseções 4.1.1 a 4.1.4, a caracterização da cinza é detalhada por meio dos ensaios de fluorescência de raios X, difração de raios X, granulometria a laser e microscopia eletrônica de varredura, respectivamente.

4.1.1 Fluorescência de raios X (FRX)

A Tabela 3 aponta os resultados de fluorescência de raios X para a cinza do bagaço da cana (CBCA) e para o cimento utilizado na pesquisa. Nota-se que a CBCA possui um alto teor de matéria orgânica, o que levou a uma perda ao fogo de 35,47%. A grande quantidade de matéria orgânica decorre da queima incompleta da cinza, que, apesar de ocorrer numa caldeira a altas temperaturas, não é suficiente para a queima completa da matéria orgânica. Ela pode aumentar a absorção de água da mistura, diminuindo a viabilidade como material na construção civil. No entanto, para esta pesquisa, dois fatores foram ponderados. Primeiro, materiais de alta absorção não são necessariamente um problema para concreto seco, uma vez que nesses concretos a relação água/cimento não rege a resistência à compressão. Além disso, calcinar a cinza para eliminar a matéria orgânica seria mais um procedimento empregado que, além de liberar CO₂ para a atmosfera, elevaria o custo agregado do produto (LIMA; BARROS; MELO NETO, 2021).

Tabela 3 ►
Resultados de FRX da
CBCA e do cimento.
Fonte: dados da pesquisa

Óxido	CBCA (%)	Cimento (%)
SiO ₂	56,42	20,57
Al ₂ O ₃	1,96	5,40
Fe ₂ O ₃	1,05	2,71
CaO	0,94	63,15
MgO	0,84	2,60
K ₂ O	1,62	0,99
Na ₂ O	0,56	0,90
SO ₃	0,07	2,15
Perda ao fogo	35,87	3,75

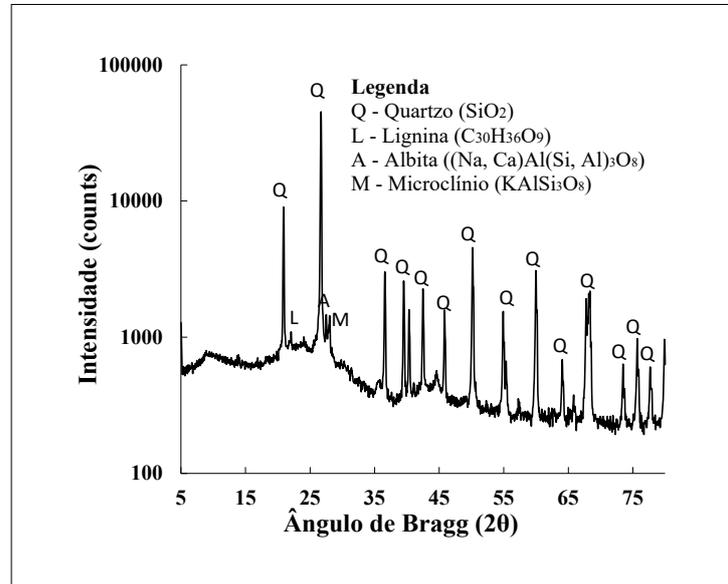
Observa-se, também, uma alta concentração de sílica, o que era esperado por se tratar de uma cinza vegetal. Entre os demais teores, pode-se destacar a presença significativa de K₂O, devido ao uso de fertilizantes no solo da lavoura. É importante sempre estar atento à presença de óxidos expansivos como K₂O e Na₂O, os quais variam de acordo com o uso de fertilizantes corretores de pH do solo e podem diminuir o potencial pozolânico da cinza.

4.1.2 Difração de raios X (DRX)

A Figura 2 apresenta a composição mineralógica da CBCA. O ensaio foi realizado na amostra moída, pois não é recomendável realizá-lo em amostras com granulometria

desuniforme e grosseira. Nota-se a presença de picos de quartzo, que ocorrem devido à contaminação da lavoura com o solo. Além do quartzo, é possível identificar pequenos picos de lignina, que é a resina naturalmente encontrada no caule dos vegetais, como também albita e microclínio, que podem ter sido originados pelo solo.

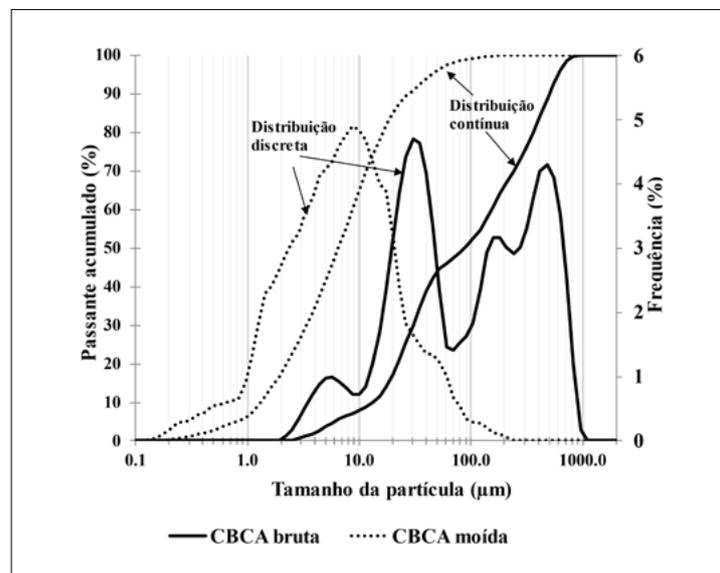
Figura 2 ►
Difratograma da CBCA.
Fonte: dados da pesquisa



4.1.3 Granulometria a laser

Por meio da granulometria a laser, foi possível obter a distribuição do tamanho de partículas (Figura 3) e, conseqüentemente, mensurar, de maneira precisa, o efeito da moagem na cinza. Observa-se que a cinza bruta apresenta uma granulometria notavelmente irregular, característica que foi confirmada com os ensaios de MEV (microscopia eletrônica de varredura). Após a moagem, a cinza apresenta uma granulometria mais uniforme e viável para ser aplicada em materiais cimentícios. A baixa resistência à moagem por parte das partículas celulares foi um facilitador no processo, o que levou a maior parte das partículas a ficarem em uma faixa inferior a $100\ \mu\text{m}$.

Figura 3 ►
Distribuição do tamanho de partículas da cinza do bagaço da cana bruta e moída.
Fonte: dados da pesquisa



4.1.4 Microscopia eletrônica de varredura (MEV)

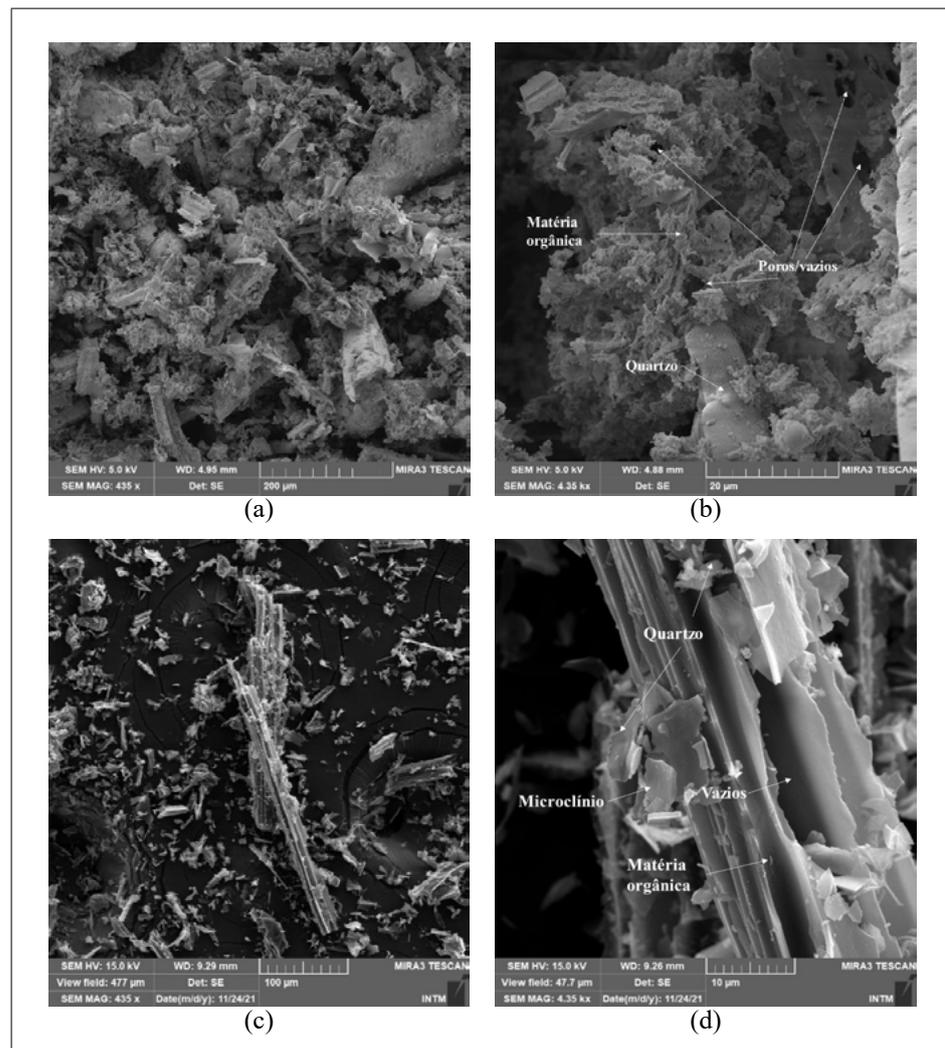
Por meio da microscopia eletrônica de varredura (MEV) acoplada com um espectrômetro de energia dispersiva (EDS), obteve-se detalhes da morfologia e composição química da microestrutura da CBCA. As imagens estão expostas na Figura 4.

Observa-se que a CBCA bruta (Figuras 4a e 4b) apresenta uma granulometria bastante heterogênea, com a presença de uma matéria orgânica celular porosa e com formato não definido. A falta de uniformidade na granulometria, que também é mostrada no ensaio de granulometria a laser, junto com a alta porosidade da matéria orgânica são os principais fatores que levam ao alto consumo de água de amassamento no momento da preparação da mistura. Tratando-se de concreto seco, esse não seria necessariamente um problema. No entanto, é importante ressaltar o efeito filer, que pode ser significativamente prejudicado com a granulometria grosseira da CBCA bruta.

Nas Figuras 4c e 4d, estão expostas imagens da CBCA moída. É possível observar uma maior uniformidade do pó moído, apesar de algumas partículas celulares ainda estarem inteiras. Na ampliação de um desses fragmentos celulares (Figura 4d), nota-se a presença de partículas com tamanho inferior a $1\ \mu\text{m}$, tratando-se de pequenas partículas de K_2O e matéria orgânica. Essa maior uniformidade é responsável por suavizar a curva granulométrica e aumentar a viabilidade do material com maior potencial do efeito filer.

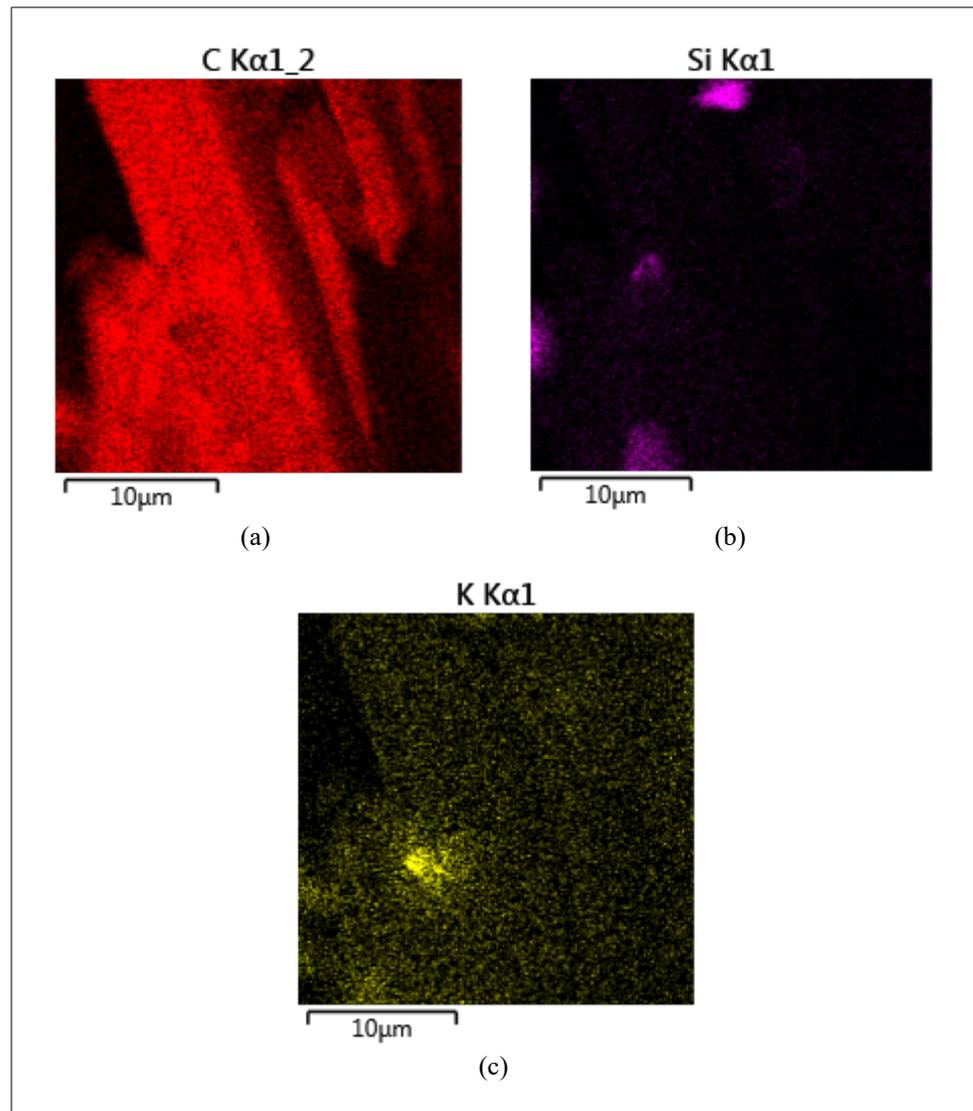
Figura 4 ►

Imagens de microscopia da CBCA bruta:
(a) Aumento de 435x;
(b) Aumento de 4350x.
CBCA moída:
(c) Aumento de 435x;
(d) Aumento de 4350x.
Fonte: dados da pesquisa



Além da análise morfológica, foi realizado um mapeamento da imagem 4d por meio de EDS, que mostra a composição química de uma estrutura celular encontrada na cinza moída. Verifica-se, portanto, que se trata de um material rico em matéria orgânica, como mostrado na Figura 5a. As regiões na cor roxa (Figura 5b) indicam pontos ricos em silício, referentes à presença de quartzo (SiO_2). Em amarelo (Figura 5c), notam-se as presenças de partículas de K_2O e microclínio. Todavia, percebe-se que, diferentemente dos outros compostos, as partículas com Si não aparecem pulverizadas, devido à maior dureza e resistência à moagem do quartzo.

Figura 5 ►
EDS realizado na Figura 4d mostrando a presença de carbono (5a), silício (5b) e potássio (5c).
Fonte: dados da pesquisa



4.2 Avaliação mecânica em concretos secos

Os resultados de resistência à compressão estão expostos na Tabela 4. Observa-se que, aos sete dias (Figura 6), a substituição de até 20% de cimento por cinza aumentou a resistência à compressão. A mistura CIM95C5 obteve o maior valor (25,87 MPa), sendo 29,81% superior ao valor do traço de referência. Como esperado, o menor valor foi verificado no traço CIM50C50, cuja resistência foi de apenas 11,20 MPa. Vale salientar que, neste estudo experimental, a relação água/cimento foi mantida para todos os traços, o que pode ter prejudicado a compactação para misturas com alto teor de

cinza, como é o caso da mistura CIM50C50. Analisando a substituição por agregado, todas as substituições resultaram em um aumento da resistência à compressão de maneira inversamente proporcional ao teor de cinza.

Tabela 4 ▶

Valores de resistência à compressão e variação em relação à mistura de referência (REF).

Fonte: dados da pesquisa

Código	7 dias		28 dias	
	Resistência à compressão (MPa)	Varição em relação ao traço REF (%)	Resistência à compressão (MPa)	Varição em relação ao traço REF (%)
REF	19,93	-	33,43	-
CIM95C5	25,87	29,81	30,23	-9,57
CIM90C10	25,28	26,83	30,46	-8,89
CIM80C20	22,83	14,57	27,69	-17,17
CIM70C30	19,74	-0,94	29,13	-12,85
CIM60C40	16,79	-15,76	22,00	-34,18
CIM50C50	11,20	-43,78	16,66	-50,15
A90C10	22,85	14,65	29,69	-11,17
A80C20	21,36	7,1	27,40	-18,03
A70C30	20,66	3,66	26,52	-20,66
A50C50	20,30	1,83	27,25	-18,49

Figura 6 ▶

Resistência à compressão das misturas com substituição de cimento por CBCA. A barra de erros indica o desvio padrão das amostras.

Fonte: dados da pesquisa

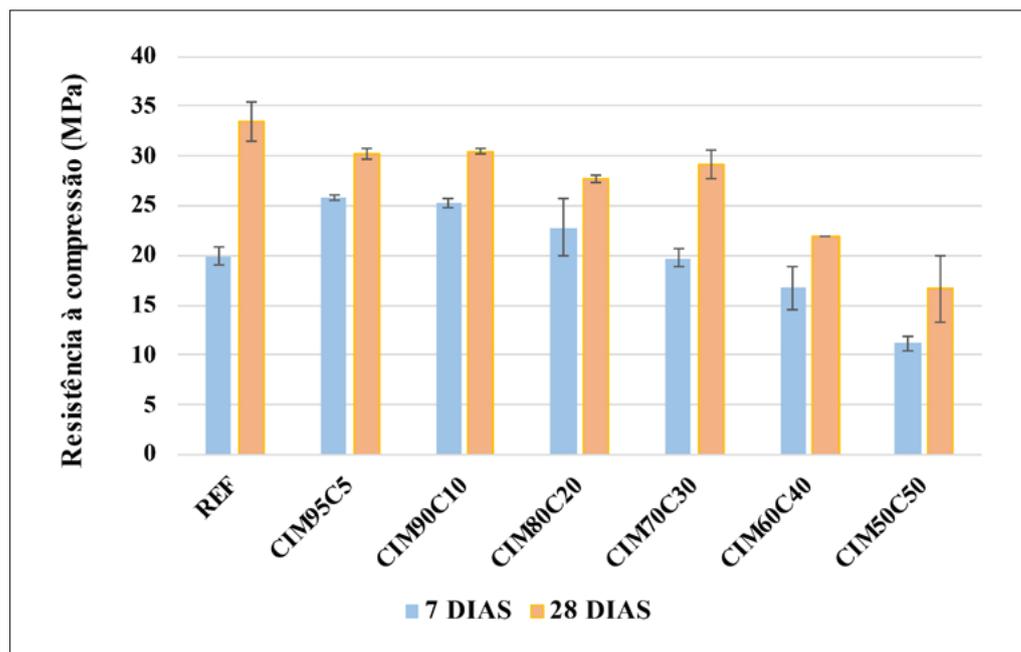
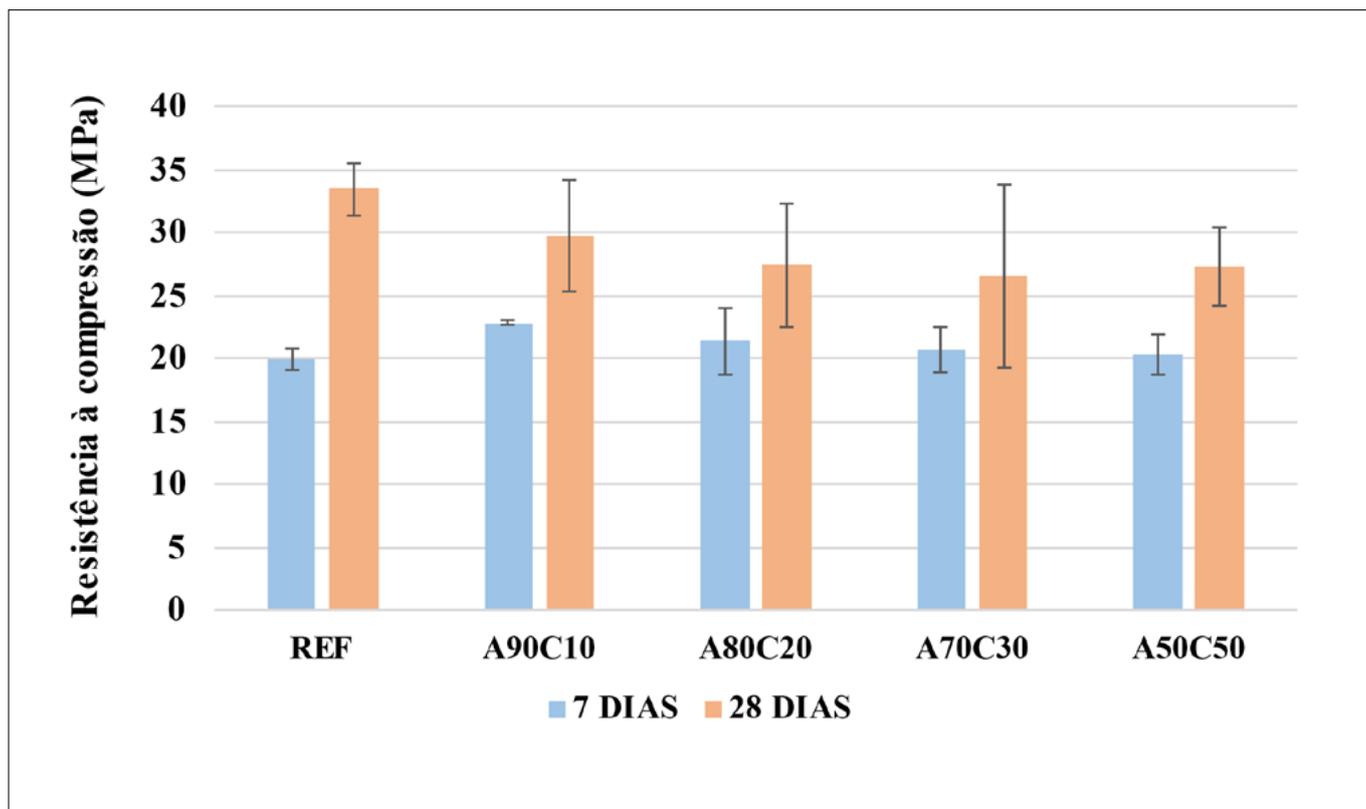


Figura 7 ▼

Resistência à compressão das misturas com substituição de agregado miúdo por CBCA. A barra de erros indica o desvio padrão das amostras.
 Fonte: dados da pesquisa

Aos 28 dias (Figura 7), todas as misturas com cinza apresentaram resistência à compressão inferior em relação à mistura de referência. As misturas CIM95C5 e CIM90C10 mostraram valores muito próximos de resistência, aproximadamente 30,3 MPa, representando uma queda de cerca de 9% em relação ao traço REF. Houve uma queda de 50,15% da resistência à compressão na mistura CIM50C50, sendo este o traço com a maior queda de resistência. Nas misturas cujo agregado foi substituído, observa-se que a diminuição de resistência foi menos acentuada para grandes porcentagens de substituição. A mistura A50C50, que obteve o maior consumo de CBCA (211,86 kg/m³) entre todas as misturas, apresentou uma queda de 18,49% na resistência.

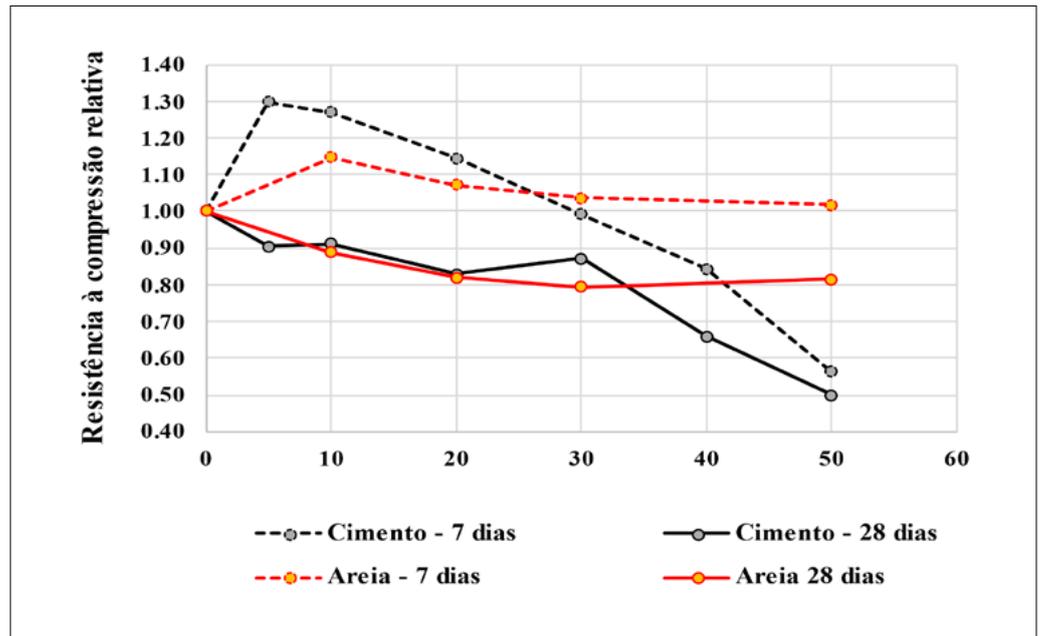


De maneira geral, a substituição do cimento ou agregado por cinza se mostrou benéfica para o concreto aos sete dias (Figura 8). Teores de até 20% foram responsáveis por elevar a resistência à compressão, principalmente na substituição do cimento. Isso pode ter ocorrido pelo efeito fíler, no qual as partículas de CBCA conseguem preencher os vazios do concreto, devido à sua elevada finura (1000 m²/kg), que é o dobro da finura do cimento. Aos 28 dias, entretanto, a cinza foi responsável por diminuir a resistência, que decresceu conforme o teor de cinza foi aumentando. Um dos motivos pode ter sido a alta absorção de água pela cinza, que poderia ter sido utilizada para a hidratação do cimento. Sabe-se que, devido à baixa umidade na mistura do concreto seco, a água que é absorvida pelos agregados e adições pode não ficar disponível para a hidratação do cimento.

Figura 8 ▶

Resistência à compressão das misturas com substituição de cimento (linhas cinza) e agregado miúdo (linhas vermelhas) por CBCA.

Fonte: dados da pesquisa



Além disso, outro fator que pode ter colaborado para o decréscimo da resistência à compressão aos 28 dias é a diminuição do teor de materiais que podem gerar produtos resistentes. É observado, na literatura, que o uso de pozolanas, como o metacaulim, pode aumentar a resistência à compressão no concreto seco (ESTOLANO, 2018; REZENDE *et al.*, 2012). O alto teor de matéria orgânica da cinza não calcinada justifica a sua baixa pozolanicidade (TORRES, 2019), e, devido a isso, a cinza não foi capaz de gerar produtos hidratados e aumentar a resistência à compressão aos 28 dias.

5 Conclusão

A caracterização da cinza mostrou que ela possui um alto teor de sílica, a qual pode se apresentar na forma cristalina ou amorfa. Devido à sua granulometria grosseira, foi necessária a realização de uma moagem, sendo a caracterização da finura realizada antes e depois da moagem.

A partir da discussão dos resultados de compressão, pode-se concluir que, analisando a resistência do traço de referência, o método de compactação utilizado nesta pesquisa se mostrou satisfatório, uma vez que conseguiu alcançar uma resistência à compressão próxima à resistência obtida na vibroprensa (33 MPa e 35 MPa, respectivamente).

Aos sete dias, a incorporação de CBCA em até 20% de substituição, tanto no cimento como na areia, foi responsável pelo aumento da resistência à compressão, devido ao efeito fíler causado pela finura elevada da cinza. Já aos 28 dias, a CBCA foi responsável pela queda da resistência à compressão, que foi proporcional ao teor de substituição no cimento. Nas misturas em que a areia foi substituída, houve uma estabilização da queda da resistência, que ficou na faixa de 20% para as misturas com 30% e 50% de substituição. A falta de capacidade pozolânica da cinza pode ter sido um causador do decréscimo da resistência.

Portanto, pode-se concluir que, dentro do cenário desta pesquisa, a cinza do bagaço in natura, desde que brevemente moída, pode ser utilizada em substituição ao agregado natural em até 50%, contanto que haja consciência de que a perda de resistência à compressão aos 28 dias pode chegar a 20%. Em relação à substituição do cimento,

recomenda-se que essa substituição seja de no máximo 30%, havendo também uma queda de 20% da resistência à compressão.

Sugere-se como trabalhos futuros que mais avaliações sejam realizadas para avaliar os efeitos da cinza do bagaço em *pavers*, observando parâmetros como resistência à tração, aderência, abrasão e absorção de água. Além desses testes, uma avaliação microestrutural nas misturas de concreto, por meio de MEV, permitiria uma melhor compreensão da disposição da cinza dentro da matriz cimentícia.

Financiamento

Esta pesquisa não recebeu financiamento externo.

Conflito de interesse

Os autores declaram não haver conflito de interesses.

Referências

ABNT – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7215**. Cimento Portland: determinação da resistência à compressão. Rio de Janeiro: ABNT, 1996.

ABNT – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR NM 248**. Agregados: determinação da composição granulométrica. Rio de Janeiro: ABNT, 2003.

ANDREW, R. M. Global CO₂ emissions from cement production. **Earth System and Science Data**, v. 10, n. 1, p. 195-217, 2018. DOI: <https://doi.org/10.5194/essd-10-195-2018>.

ARIF, E.; CLARK, M. W.; LAKE, N. Sugar cane bagasse ash from a high-efficiency co-generation boiler as filler in concrete. **Construction and Building Materials**, v. 151, p. 692-703, 2017. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.06.136>.

BEGA, R. M. **Aplicação de cinza do bagaço de cana-de-açúcar em latossolo cultivado com cana-de-açúcar**. 2014. 68 f. Tese (Doutorado em Agronomia) – Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias, Universidade Estadual Paulista, Jaboticabal, 2014. Disponível em: <https://repositorio.unesp.br/handle/11449/122232>. Acesso em: 13 abr. 2022.

BITTENCOURT, S. F. **Avaliação da resistência à compressão de pavers produzidos com agregados de resíduos de construção e demolição e areia de fundição**. 2012. Dissertação (Mestrado em Tecnologia e Inovação) – Faculdade de Tecnologia, Universidade Estadual de Campinas, Limeira, 2012. DOI: <https://doi.org/10.47749/T/UNICAMP.2012.850357>.

CORDEIRO, G. C.; TAVARES, L. M.; TOLEDO FILHO, R. D. Improved pozzolanic activity of sugar cane bagasse ash by selective grinding and classification. **Cement and Concrete Research**, v. 89, p. 269-275, 2016. DOI: <https://dx.doi.org/10.1016/j.cemconres.2016.08.020>.

CORDEIRO, G. C.; TOLEDO FILHO, R. D.; FAIRBAIRN, E. 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, n. 1, p. 50-67, 2010. DOI: <https://doi.org/10.1590/S1983-41952010000100004>.

CORDEIRO, G. C.; TOLEDO FILHO, R. D.; TAVARES, L. M.; FAIRBAIRN, E. M. R. Pozzolanic activity and filler effect of sugar cane bagasse ash in Portland cement and lime mortars. **Cement and Concrete Composites**, v. 30, n. 5, p. 410-418, 2008. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2008.01.001>.

ESTOLANO, A. M. L. **Efeitos do metacaulim sobre blocos intertravados de concreto (pavers)**. 2018. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Católica de Pernambuco, Recife, 2018. Disponível em: <http://tede2.unicap.br:8080/handle/tede/1079>. Acesso em: 13 abr. 2022.

ESTOLANO, A. M. L.; LIMA, V. M. E.; LIMA, N. B.; BERENQUER, R. A.; NASCIMENTO, H. C. B.; ROCHA, G. G. O. P.; LIMA, N. B. D.; CARNEIRO, A. M. P.; OLIVEIRA, R. A. Incorporating metakaolin in paving blocks: effect on physical and mechanical properties. **International Journal of Pavement Engineering**, v. 4, n. 1, 2013481, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1080/10298436.2021.2013481>.

FERNANDES, I. **Bloco e pavers: produção e controle de qualidade**. 7. ed. Ribeirão Preto: Treino Assessoria e Treinamentos Empresariais, 2016.

FRASSON JUNIOR, A. **Proposta de metodologia de dosagem e controle do processo produtivo de blocos de concreto para alvenaria estrutural**. 2000. 146 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2000. Disponível em: <https://repositorio.ufsc.br/xmlui/handle/123456789/78274>. Acesso em: 13 abr. 2022.

LIMA, V. M. E. **Avaliação de propriedades físicas e mecânicas de concretos produzidos com agregados reciclados oriundos de resíduos de uma indústria de pré-fabricados de concreto**. 2017. 216 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Escola Politécnica de Pernambuco, Universidade de Pernambuco, Recife, 2017.

LIMA, V. M. E.; BARROS, L. C.; MELO NETO, A. A. Characterization of sugarcane bagasse ash (SBA) and its evaluation for use in alkali-activated slag mixtures. **Cerâmica**, v. 67, n. 381, p. 123-130, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1590/0366-69132021673813038>.

LINCY, G. A.; VELKENEDY, R. Experimental optimization of metakaolin and nanosilica composite for geopolymer concrete paver blocks. **Structural Concrete. Journal of the fib**, v. 22, n. 51, p. E442-E451, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1002/suco.201900555>.

MORETTI, J. P.; SALES, A.; ALMEIDA, F. C. R.; REZENDE, M. A. M.; GROMBONI, P. P. Joint use of construction waste (CW) and sugarcane bagasse ash sand (SBAS) in concrete. **Construction and Building Materials**, v. 113, p. 317-323, 2016. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.03.062>.

RAJKUMAR, P. R. K.; KRISHNAN, K. D.; RAVICHANDRAN, P. T.; HARINI, T. A. Study on the use of bagasse ash paver blocks in low volume traffic road pavement. **Indian Journal of Science and Technology**, v. 9, n. 5, p. 1-6, 2016. DOI: <https://dx.doi.org/10.17485/ijst/2016/v9i5/87256>.

REZENDE, M. L. S.; NASCIMENTO, J. W. B.; NEVES, G. A.; SILVA, F. L. H.; LEAL, A. F.; FERREIRA, H. C. Uso de metacaulim em concreto seco: uma abordagem por superfície de resposta. **Ambiente Construído**, v. 12, n. 3, p. 135-146, 2012. DOI: <https://doi.org/10.1590/S1678-86212012000300010>.

SIQUEIRA, L. V. M.; STRAMARI, M. R.; FOLGUERAS, M. V. Adição de poliuretano expandido para a confecção de blocos de concreto leve. **Revista Matéria**, v. 9, n. 4, p. 399-410, 2004. Disponível em: <http://www.materia.coppe.ufrj.br/sarra/artigos/artigo10607/>. Acesso em: 13 abr. 2022.

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. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Centro de Tecnologia e Geociências, Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2019. Disponível em: <https://repositorio.ufpe.br/handle/123456789/33211>. Acesso em: 13 abr. 2022.