

Avaliação da influência da adição da cinza do bagaço da cana-de-açúcar na mitigação da reação álcali-agregado

Evaluation of the influence of the addition of sugarcane bagasse ash on the mitigation of the alkali-aggregate reaction

DOI:10.34117/bjdv7n3-416

Recebimento dos originais: 08/02/2021

Aceitação para publicação: 17/03/2021

José Vitor da Silva Macedo

Mestre em Engenharia Civil

Instituição: Escola Politécnica de Pernambuco - Universidade de Pernambuco

Endereço: Rua Benfica, 455 – Madalena, Recife-PE. CEP: 50720-001

E-mail: jose.vitor@hotmail.com

Bernardo Inojosa Lyra

Graduado em Engenharia Civil

Instituição: Escola Politécnica de Pernambuco - Universidade de Pernambuco

Endereço: Rua Benfica, 455 – Madalena, Recife-PE. CEP: 50720-001

E-mail: bernardo.lyra17@gmail.com

Eliana Cristina Barreto Monteiro

Doutora em Engenharia Civil

Instituição: Escola Politécnica de Pernambuco - Universidade de Pernambuco e

Universidade Católica de Pernambuco

Endereço: Rua Benfica, 455 – Madalena, Recife-PE. CEP: 50720-001

E-mail: eliana@poli.br

Angelo Just da Costa e Silva

Doutor em Engenharia Civil

Instituição: Escola Politécnica de Pernambuco - Universidade de Pernambuco e

Universidade Católica de Pernambuco

Endereço: Rua do Príncipe, 526 – Boa Vista, Recife-PE. CEP: 50050-900

E-mail: angelo@tecomat.com.br

Tibério Wanderley Correia de Oliveira Andrade

Doutorando em Engenharia Civil

Instituição: Universidade Federal de Pernambuco

Endereço: Avenida Professor Moraes Rego, 1235 – Cidade Universitária, Recife-PE.

CEP: 50670-901

E-mail: tiberio@tecomat.com.br

RESUMO

O objetivo deste trabalho é avaliar a influência da adição da cinza do bagaço da cana-de-açúcar (CBCA) em substituição parcial do cimento Portland na mitigação da reação álcali-agregado (RAA). A metodologia compreende na caracterização físico-química da CBCA, ensaio de petrografia do agregado reativo e a realização de ensaios laboratoriais em corpos-de-prova de barras de argamassas nos percentuais de substituição 0, 10, 20 e 25% do

cimento Portland pela CBCA. De posse dos resultados, depreendeu-se que ocorreu uma mitigação da RAA para as argamassas produzidas com a CBCA. Conclui-se que o percentual de 25% de substituição atingiu o limite estabelecido por norma para a inibição total do RAA provando assim a eficácia da CBCA.

Palavras-chave: Reação Álcali-Agregado, Cinza do Bagaço da Cana-de-açúcar, Materiais Pozolânicos.

ABSTRACT

This paper aims to evaluate the influence of sugarcane bagasse ash (SBA) on partial replacement of Portland cement in alkaline-aggregate reaction (AAR) mitigation. The methodology includes the physicochemical characterization of SBA, petrography of the reactive aggregate and laboratory tests on mortar bars in the 0, 10, 20 and 25% percentages of Portland cement by SBA. Based on the results, it was found that AAR mitigation occurred for mortars produced with CBCA. It is concluded that the 25% replacement percentage reached the limit established by norm for total inhibition of AAR thus proving the efficacy of SBA.

Keywords: Alkali-Aggregate Reaction, Sugarcane bagasse ash, Pozolanic Materials.

1 INTRODUÇÃO

A reação álcali-agregado (RAA) é uma manifestação patológica causada pela reação química entre os minerais reativos dos agregados e os óxidos alcalinos de sódio e/ou potássio (Na_2O e K_2O , respectivamente), provenientes essencialmente do cimento, formando um gel que na presença de água se expande no interior do concreto ou argamassa. A expansão deste gel, que se deposita nos poros da estrutura, pode gerar fissuras, deslocamentos, podendo levar até a ruptura da estrutura caso a tensão chegue a um nível no qual o concreto ou argamassa não resista (Poole, 1992; Figuerôa and Andrade, 2007; Fernandes and Broekmas, 2013).

O surgimento e a magnitude deste fenômeno dependem de vários fatores como a presença de agregados reativos, álcalis (provenientes geralmente do cimento) na solução de poros e teor de umidade. Segundo a Haskapy (2005), existem algumas medidas preventivas para a mitigação da RAA como (i) a limitação do teor de álcalis no concreto, (ii) o uso de agregados não reativos e (iii) a utilização de materiais inibidores da RAA (pozolanas naturais, sílica ativa, cinzas volantes metacaulim, etc.).

De acordo com Thomas (2011), o uso de adições ao cimento é a medida preventiva mais usada para a inibição da RAA. Alguns resíduos de termoeletricas com caldeiras de biomassa podem ser considerados materiais pozolânicos como a cinza da casca de arroz (Sandhu and Siddique, 2017). Segundo Katere e Madurwar (2017), existem também

estudos que avaliaram a pozolanicidade da cinza do bagaço da cana-de-açúcar (CBCA), porém a literatura dessa inibição quanto a RAA ainda é reduzida.

Cordeiro et al. (2009) determinou que a CBCA é constituída basicamente de sílica (SiO_2), possuindo um potencial para ser utilizada como adição mineral, substituindo parte do cimento em argamassas e concretos, e atuando como material pozolânico. Santos et al. (2020) concluiu que quando empregada em substituição na parcela de cimento Portland, a CBCA apresenta resultados satisfatórios e similares aos compósitos de referência em função do seu comportamento pozolânico, reduzindo assim o consumo de cimento necessário e consequentemente a emissão de gases nocivos na atmosfera provenientes do processo de fabricação.

Pozolana é um material natural ou artificial que contém sílica em forma reativa. De acordo com a norma C 125-03 (ASTM, 2003), pozolanas são materiais silicosos ou silicoaluminosos que, por si sós, possuem pouca ou nenhuma atividade aglomerante, mas que, quando finamente divididos e na presença da água, reagem com o hidróxido de cálcio à temperatura ambiente para formar compostos com propriedades aglomerantes. Dessa forma, em compostos a base de cimento Portland, o hidróxido de cálcio liberado pela hidratação dos silicatos, reage com o dióxido de silício (SiO_2) presente na pozolana, resultando em uma produção extra de silicatos de cálcio hidratados, que são produtos mais estáveis do cimento hidratado responsáveis pelo endurecimento do cimento.

Kazmi et al. (2017) identificou que a CBCA ajuda a aglutinar álcalis, como resultado da reação pozolânica, e, devido a diminuição da concentração de álcalis, a sua adição no concreto consequentemente levou à redução da expansão do RAA. Saraiva (2017) também concluiu que a adição de CBCA minimizou as expansões dos compósitos cimentícios em comparação aos corpos-de-prova de referência, que possuíam agregados reativos. Já segundo Cordeiro et al. (2016) para a efetiva aplicação de CBCA em argamassa e concreto é necessário, primeiro, que ela seja processada, o que lhe permite atingir a finura e a homogeneidade que são necessárias para atender aos padrões da indústria, sendo observado que a atividade pozolânica da cinza está diretamente relacionada à sua finura.

Dentre os benefícios obtidos pelo emprego das adições pozolânicas no concreto, destacam-se: a melhora na resistência à fissuração térmica devido ao calor de hidratação mais baixo, o aumento da resistência e da impermeabilidade por refinamento dos poros, o fortalecimento da zona de transição, melhora na durabilidade aos ataques químicos, tais como, águas sulfatadas e expansão álcali-agregado.

Sabe-se, também, que a produção de cana-de-açúcar no Brasil vem aumentando desde o ano de 2003, motivada pelo crescimento da demanda de açúcar no mercado internacional, com a reforma da política europeia para o produto, e pelo uso crescente do etanol, a partir do desenvolvimento dos veículos com motores Flex Fuel no País (Federação das indústrias do estado de São Paulo - FIESP, 2013). Cordeiro (2006), em seu estudo experimental, percebeu que 0,7% do bagaço queimado em massa se transforma na forma de cinza residual. Só na safra de 2017/2018, estima-se, portanto, que foi produzida cerca de 4,5 milhões de toneladas de CBCA no Brasil, evidenciando a necessidade de uma destinação própria.

Além das vantagens mecânicas conferidas ao concreto, segundo Teodoro et al. (2013), o uso de pozolanas como substituição agregar valor econômico para este resíduo e também gera benefícios ambientais, eliminando grande quantidade de material que de outra forma seria descartado como lixo e reduzindo o uso de clínquer do cimento, diminuindo assim a emissão de CO₂ que é liberado durante a sua fabricação. É importante destacar que a queima do bagaço durante o processo de cogeração de energia produz substancial liberação de CO₂, entretanto, de acordo com Cordeiro et al. (2009), o balanço nas emissões de CO₂ é praticamente nulo, pois, através da fotossíntese, a biomassa queimada é repostada no ciclo seguinte da cultura da cana-de-açúcar.

Neste contexto, o presente trabalho tem como objetivo avaliar a inibição da ocorrência da reação álcali-agregado pela adição de cinzas de bagaço de cana-de-açúcar a partir da expansão de argamassas com um agregado reativo, com substituição do cimento Portland pela CBCA em percentagens de 0, 10, 20 e 25%.

2 METODOLOGIA

Tomou-se como base para a construção desta metodologia, vários trabalhos da literatura brasileira e internacional (Ganesan et al., 2007; Cordeiro et al., 2009; Chusilp et al., 2009; Ribeiro e Morelli., 2014; Bahurudeen et al., 2015; Góes, 2016; Cordeiro et al., 2016; Saraiva, 2017; Kazmi et al., 2017; Berenguer et al., 2018; Ojeda-Farias et al., 2018).

2.1 MATERIAIS

2.1.1 Aditivo, água e hidróxido de sódio

A fim de ajustar o espalhamento da argamassa para a realização da moldagem, utilizou-se o aditivo superplastificante de pega acelerada de terceira geração para concreto

de alto desempenho (SP – II A) segundo a NBR 11768 (ABNT, 2011) cujas propriedades estão dispostas na Tabela 1.

Tabela 1 - Propriedades e características do Aditivo Sika ViscoCrete 20 HE.

Propriedades e características	Resultados
Base Química	Solução de policarboxilatos em meio aquoso
Densidade	1,07 ±0,02 kg/litro
pH	5,5±1,0

Fonte: Autor.

Para a realização de ensaios de barras de argamassa as mesmas ficaram imersas em uma solução saturada de hidróxido de sódio. Foi utilizado hidróxido de sódio disponível no mercado e água destilada para a fabricação da solução.

2.1.2 Cimento

Nesta pesquisa, o cimento utilizado em todos os ensaios foi o cimento CP V ARI, normatizado pela NBR 16697 (ABNT, 2018). Estão expostos nas Tabelas 2 e 3 os resultados da caracterização química e física, respectivamente, do CP V – ARI.

Tabela 2. Caracterização química do cimento utilizado.

Ensaio	Metodologia	Unidade	Resultado	Exigências normativas
Resíduo insolúvel - RI	NBR NM 15 (ABNT, 2012)	%	0,88	≤ 1,00
Perda ao fogo – PF	NBR NM 18 (ABNT 2012)	%	2,44	≤ 4,50
Óxido de Magnésio - MgO	NBR NM 14 (ABNT, 2012)	%	1,71	≤ 6,50
Trióxido de Enxofre - SO ₃	NBR NM 16 (ABNT, 2012)	%	3,35	≤ 4,50
Anidrido Carbônico – CO ₂	NBR NM 20 (ABNT, 2012)	%	2,01	≤ 3,00

Fonte: Autor.

Tabela 3. Caracterização física do cimento utilizado.

Ensaio	Metodologia	Unidade	Resultado	Exigências normativas
Área Específica (Blaine)	NBR 16372 (ABNT, 2015)	cm ² /g	4.309	≥ 3.000
Massa Específica	NBR NM 23 (ABNT 2001)	g/cm ³	3,10	Não se aplica
Índice de finura - #75 µm (nº 200)	NBR 11579 (ABNT, 2013)	%	0,08	≤ 6,00
Água de consistência normal	NBR 16606 (ABNT, 2017)	%	31,40	Não se aplica

Início de pega	NBR 16607 (ABNT, 2017)	minutos	157	≥ 60
Fim de pega	NBR 16607 (ABNT, 2017)	minutos	218	≤ 600
Expansibilidade a quente	NBR 11582 (ABNT, 2016)	mm	0,01	$\leq 5,00$

Fonte: Autor.

2.1.3 Agregado

O agregado miúdo utilizado nos ensaios de expansão em barras de argamassa pelo método acelerado foi um agregado artificial adquirido após o processo de britagem de uma pedra. Esta pedra foi a selecionada, pois algumas obras acometidas pela manifestação da reação álcali-agregado da Região Metropolitana de Recife utilizaram a brita deste lugar.

O agregado artificial foi caracterizado, antes da britagem, através do ensaio de petrografia segundo a NBR 7389-2 (ABNT, 2009).

Para a realização do ensaio de petrografia do agregado artificial, foram analisadas características gerais, macroscópicas do agregado (Tabela 4) e a descrição petrográfica propriamente dita feita com o uso de um microscópio óptico de luz transmitida, apresentada no Tabela 5.

Tabela 4. Características Gerais do Agregado.

Características		
Tipo		Pedra britada
Cor		Cinza
Forma		Equidimensional a lamelar
Grau de arredondamento		Angulosos
Caracterização físico-mecânica	Friabilidade	Não friável
	Compacidade	Compacto
	Tenacidade	Elevada

Fonte: Autor.

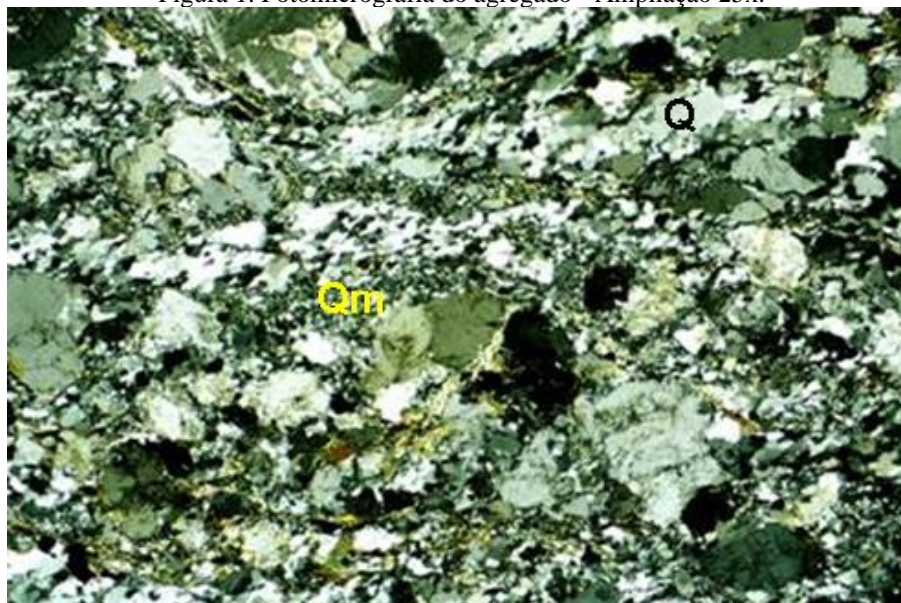
Tabela 5. Síntese das características petrográficas do agregado.

Características microscópicas		
Estrutura		Foliado orientado
Textura		Milonítica
Granulação		Média
Alteração		Pouco alterado a são
Deformação do agregado		Deformado
Tipo de Rocha		Metamórfica
Classificação petrográfica		Milonito
Minerologia	Principal	Quartzo, feldspato e mica
	Subordinada	Titanita e opacos
	Reativa/Deletéria	Quartzo deformado com extinção ondulante, quartzo fino e quartzo recristalizado
Reatividade Potencial		Agregado reativo

Fonte: Autor.

Do ponto de vista mineralógico, a deformação observada nos agregados favorece o desencadeamento de reações expansivas do tipo álcali-silicato. A presença de quartzo com extinção ondulante, de massas de quartzo fino e quartzo recristalizado são feições que conferem ao agregado o caráter reativo. O agregado possui características texturais que permitem caracterizá-lo como potencialmente reativo frente aos álcalis. Na Figura 1 é possível observar a fotomicrografia do agregado no qual se observam cristais de quartzo deformado (Q) e massa de quartzo fino (Qm).

Figura 1. Fotomicrografia do agregado - Ampliação 25x.



Fonte: Autor.

2.1.4 Cinza

As cinzas utilizadas na pesquisa foram coletadas em uma usina, situada no município de Igarassu, Região Metropolitana do Recife, no Estado de Pernambuco distante cerca de 48 km do centro de Recife. Estas amostras foram secadas em estufa, moídas por 30 minutos na rotação de 60 rpm porque este processo aumenta a ação pozzolânica da CBCA (Cordeiro et al., 2016), e peneiradas em uma peneira de abertura 0,075 mm para que a sua granulometria se assemelhasse a do Cimento Portland.

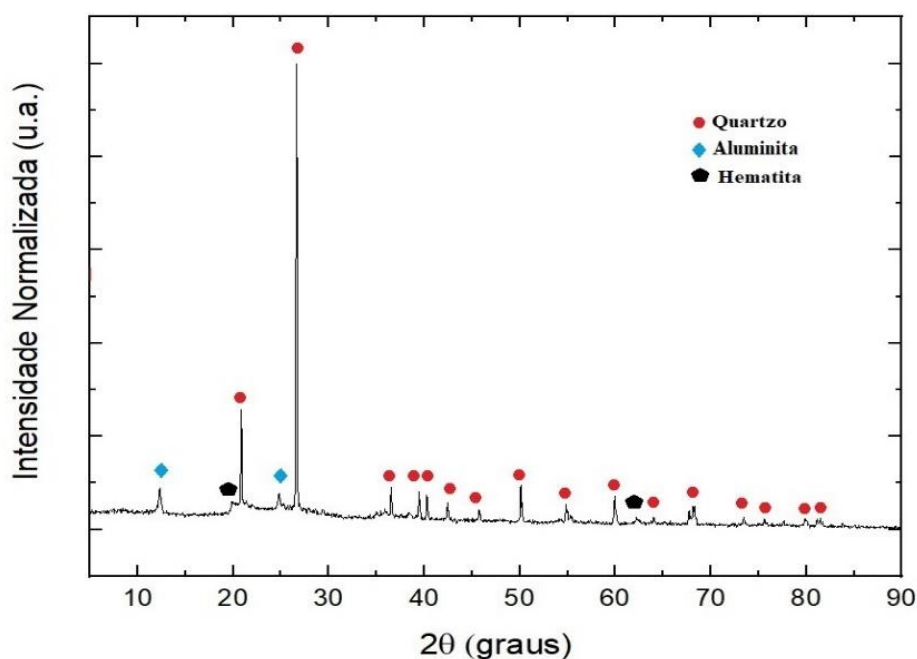
A CBCA foi caracterizada físico-quimicamente a fim de analisar a sua pozzolanidade pelos ensaios de espectrometria de difração de raios X (DRX), espectrometria de fluorescência de raios X (FRX), granulometria à laser, análise da área superficial específica pela técnica Brunauer-Emmet-Teller (BET), análise termogravimétrica da CBCA e massa específica aparente.

2.1.4.1 Ensaio de espectrometria de difração de raio x (DRX)

Para o ensaio de DRX, utilizou-se os seguintes parâmetros: variação de ângulo de incidência 2θ de 5° a 90° com velocidade de $1^\circ/\text{min}$, voltagem de 40 kV e corrente de 40 mA com filtro de Níquel, sob radiação por tudo de Cobre. Os resultados dos ensaios do difratômetro foram analisados, primeiramente, no programa X'Pert HighScore Plus, a fim de encontrar os picos do difratograma e de comparar os difratogramas das amostras com a base de dados PDF-2 da International Centre for Diffraction Data.

A Figura 2 apresenta o difratograma da cinza o qual apresenta picos de dióxido de silício na forma de quartzo. Estes resultados se assemelham aos estudos de Ribeiro e Morelli (2014) e Saraiva (2017). A presença de sílica amorfa confere atividade pozolânica à cinza (Cordeiro, 2009).

Figura 2. Difratograma da CBCA.



Fonte: Autor.

2.1.4.2 Ensaio de espectrometria de fluorescência de raio x (FRX)

No ensaio de FRX, uma alíquota da amostra foi secada em estufa a 110°C . Em seguida, uma porção de amostra seca foi prensada em cápsulas de alumínio com 30 toneladas de força. A pastilha prensada foi analisada em espectrômetro de fluorescência de raios-X.

As composições químicas dos óxidos da CBCA pelo FRX estão apresentadas na Tabela 6. Esta composição química é similar à do estudo de Ganesan et. al (2007), Cordeiro

(2009), Berenguer et al. (2018) e Ojeda-farias et al. (2018). A ATSM C 618 (2017) estabelece o requisito químico para materiais pozolânicos em relação aos óxidos: a soma de $\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3$ deve ser maior que 70% para pozolana da classe N (foi observado 81,54% na CBCA deste estudo).

Tabela 6. Composição química da CBCA por FRX.

Compostos	(%)	Compostos	(%)	Compostos	(%)
SiO_2	60,24	TiO_2	1,53	Cr_2O_3	0,04
Al_2O_3	14,38	SO_3	1,32	SrO	0,03
Fe_2O_3	6,92	Na_2O	0,29	V_2O_5	0,02
K_2O	5,29	ZrO_2	0,29	CuO	0,02
CaO	4,17	MnO	0,16	NiO	0,01
P_2O_5	3,56	BaO	0,11	Rb_2O	0,01
MgO	1,53	ZnO	0,05	Nb_2O_5	0,01

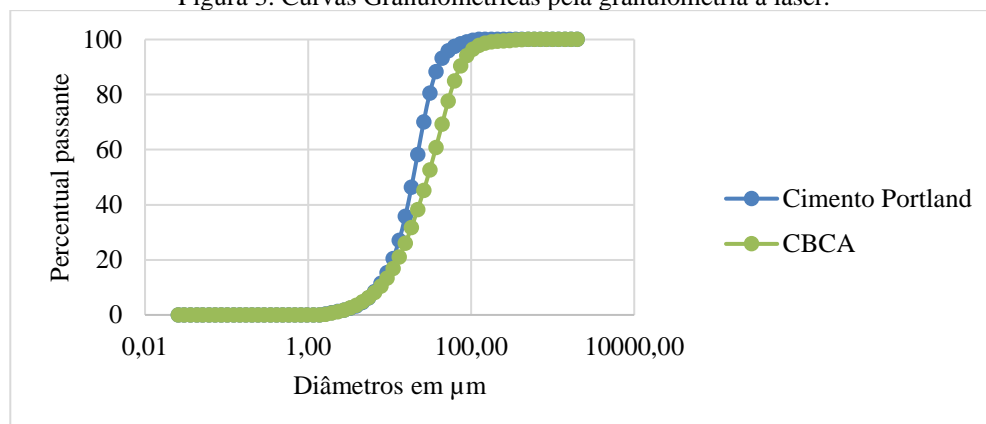
Fonte: Autor.

2.1.4.3 Granulometria a Laser

A granulometria à laser, ou Análise de Distribuição de Tamanho de Partículas por Espalhamento Dinâmico de Luz, foi realizada m meio líquido, teve como solvente água destilada com o uso de ultrassom durante 60 segundos e a obscuridade atingida foi de 10%. Devido à falta de índice de refração do material foi utilizado o modelo de Fraunhofer para aproximação.

As curvas granulométricas da CBCA e do Cimento Portland obtidas de acordo com o método de granulometria à laser estão dispostas na Figura 3. Percebe-se que a distribuição granulométrica do Cimento Portland se assemelha mais à distribuição da CBCA.

Figura 3. Curvas Granulométricas pela granulometria à laser.



Fonte: Autor.

2.1.4.4 Análise da área superficial específica das cinzas pela técnica BET

Na análise da área superficial específica das cinzas pela técnica BET, o material foi tratado em estação a vácuo e então promovido a adsorção do gás (nitrogênio). A adsorção foi feita pela inserção do nitrogênio sob pressão controlada para a estação de análise, à baixa temperatura. A área superficial foi determinada a partir da relação da quantidade de gás adsorvido/dessorvido e a pressão do gás (isoterma). Esta técnica foi escolhida em detrimento do método de Blaine, pois este método tem uma limitação quando as partículas têm a área específica maior de 8000 cm²/g como a CBCA, segundo a NBR 16372 (ABNT, 2015).

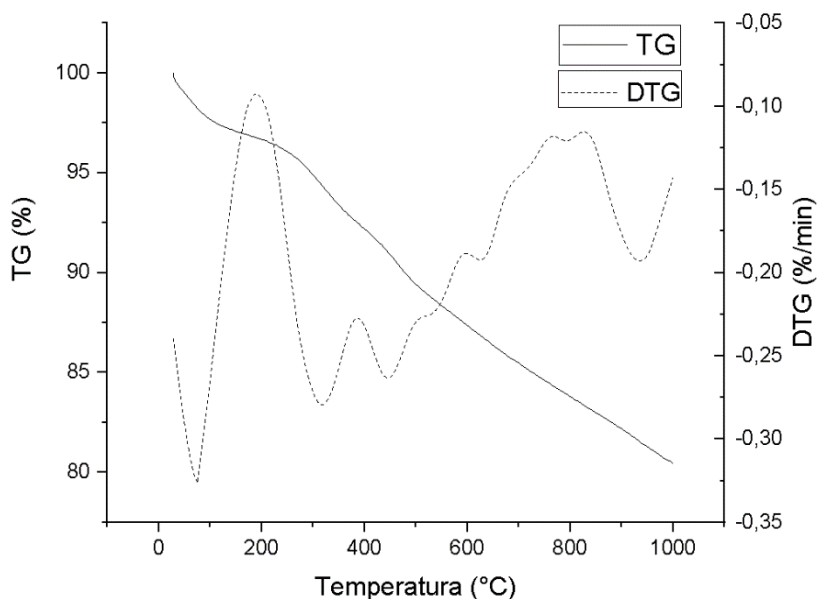
O resultado da área superficial específica BET foi de 1,3269 m²/g para o Cimento Portland e 24,3469 m²/g para a CBCA. Verifica-se que a área superficial da cinza é muito maior do que a do cimento, sendo cerca de 18 vezes maior do que a do cimento. Uma área superficial maior significa uma perda da trabalhabilidade e uma possível melhora da durabilidade dos compósitos cimentícios. No trabalho de Costa (2017), o resultado da área superficial (BET) foi de 84,62 m²/g para CBCA passantes na peneira de nº 400. Esta diferença é bastante expressiva, porém pode ser explicada pela diferença dos processos de peneiramento, já que o presente trabalho utilizou as cinzas passantes da peneira nº 200.

2.1.4.5 Análise Termogravimétrica

Na análise termogravimétrica a CBCA foi inserida no equipamento que aquece e comutativamente uma balança fornece dados da massa e o ensaio de massa específica aparente foi feita segundo a NM 23 (ABNT, 2001).

A análise termogravimétrica da CBCA é apresentada na Figura 4, na qual apresenta uma queda de 2,45% por volta da temperatura 100 °C (provavelmente devido à perda de umidade da amostra). Entre as temperaturas de 200 °C e 600 °C, houve novamente uma queda de 12,63% em massa, isso se deve pelo desprendimento de carbonos voláteis. Na temperatura de 1000 °C, houve uma massa residual de 80,45%.

Figura 4. Análise termogravimétrica.



Fonte: Autor.

Taylor (1997) prova que a decomposição do hidróxido de cálcio ocorre entre 425 °C e 550 °C. Portanto, caso haja uma diminuição do pico neste intervalo, pode-se ter ocorrido uma atividade pozolânica. Percebe-se na Figura 4, que houve um decréscimo de massa nesta faixa de temperatura que deve ser resultado da decomposição da portlandita em CaO e água. Este resultado é similar ao de Góes (2016) para cinzas calcinadas à 400°C e que passaram na peneira #200.

2.1.4.6 Massa específica aparente

A massa específica aparente da cinza obtida por meio do frasco volumétrico de Le Chatelier teve o valor de 2,20 g/cm³. Percebe-se que este resultado é menor ao do cimento observado na Tabela 3. No entanto, é similar àquela utilizada no estudo de Silva (2018), semelhante a massa específica da sílica ativa (cerca de 2,20 g/cm³) e um pouco menor que a do metacaulim (cerca de 2,60 g/cm³).

2.2 MÉTODOS

2.2.1 Ensaio de expansibilidade de barras de argamassa

A moldagem das argamassas e a avaliação do seu comportamento foram norteadas pela NBR 15577 (ABNT, 2008) e pela ASTM C1567 – 13 (2013). Segundo estas normas, deve-se utilizar uma relação a/c igual a 0,47 em massa e uma proporção de uma parte de

cimento para cada 2,25 em massa de agregado separado. A Tabela 7 apresenta o quantitativo de materiais utilizados para a produção de cada família.

Tabela 7. Quantitativo de materiais para a produção da argamassa.

Família	Cimento (g)	Agregado (g)	Água (kg)	CBCA (g)	Aditivo(g)
0% (referência)	440	990	206,8	-	-
10%	396	990	206,8	44	1,33
20%	352	990	206,8	88	2,33
25%	330	990	206,8	132	2,75

Fonte: Autor.

De acordo com a NBR 15577 (ABNT, 2018) é necessário realizar leituras de expansibilidade nas idades de 16 e 30 dias e outras em no mínimo 3 idades intermediárias antes da idade 16 dias mais 3 leituras intermediárias entre as idades de 16 e 30 dias. Porém, para termos uma melhor amostragem nesse estudo, foram realizadas 5 leituras intermediárias antes e após os 16 dias.

3 RESULTADOS E DISCUSSÕES

3.1 ENSAIO DE EXPANSIBILIDADE DAS BARRAS DE ARGAMASSA

Observa-se na Tabela 8 a expansibilidade dos corpos de provas moldados com 10% (CP10), 20% (CP20) e 25% (CP25) em CBCA em substituição do cimento, bem como o corpo de prova de referência (CP0) sem adição.

A Figura 5 mostra de forma gráfica as expansibilidades dos corpos de provas analisados em relação as suas idades, como também os limites estabelecidos para que os compostos cimentícios não sejam considerados sujeitos a reação álcali-agregados.

Tabela 8. Composição química da CBCA por FRX.

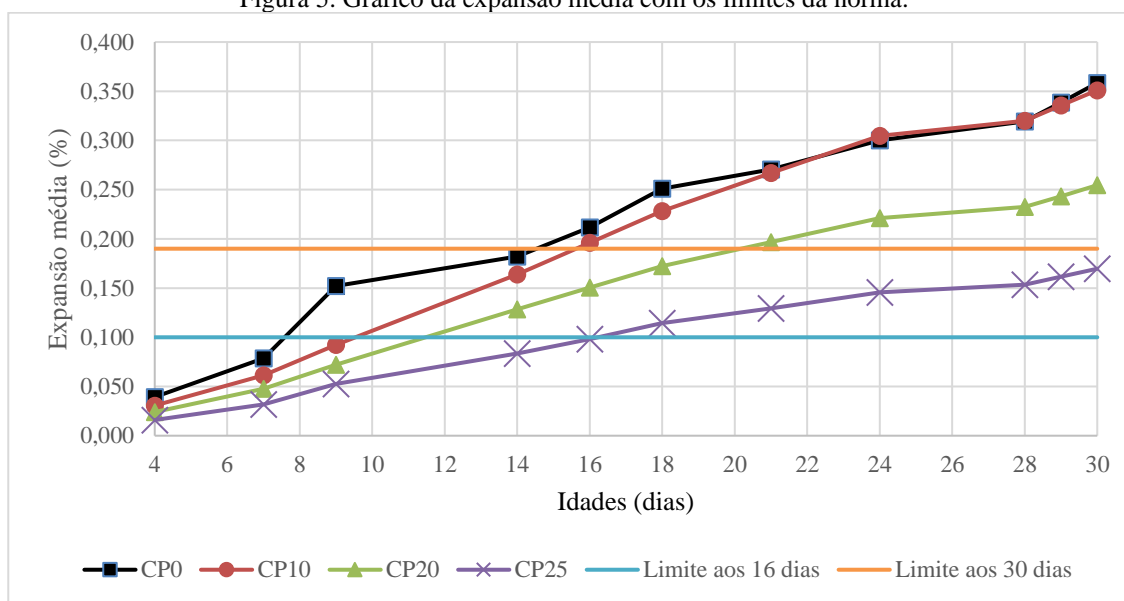
Idade em dias	Expansão média (%)			
	CP0	CP10	CP20	CP25
4	0,039	0,031	0,024	0,016
7	0,079	0,061	0,048	0,032
9	0,152	0,092	0,072	0,053
14	0,182	0,164	0,128	0,083
16	0,212	0,196	0,150	0,098
18	0,251	0,228	0,172	0,115
21	0,271	0,267	0,197	0,129
24	0,300	0,305	0,221	0,146
28	0,319	0,320	0,232	0,154
29	0,338	0,336	0,243	0,161
30	0,358	0,351	0,255	0,170

Fonte: Autor.

Para que um agregado seja considerado inerte quanto ao seu carácter expansivo para a reação álcali-agregado neste método acelerado de expansão em barras, a argamassa deve expandir menos de 0,10% aos 16 dias e 0,19% aos 30 dias de moldagem para o corpo de prova sem adições.

Analisando-se a Tabela 8, é notório que o agregado utilizado nesta pesquisa tem um carácter expansivo uma vez que o corpo de prova de referência teve uma expansão média de 0,212% aos 16 dias e 0,358% aos 30 dias.

Figura 5. Gráfico da expansão média com os limites da norma.



Fonte: Autor.

O CP10 teve como expansão média 0,196% aos 16 dias e 0,351% aos 30 dias. Esses resultados estão acima do limite previsto para a inibição da reação. Porém, com a substituição de 10% de cimento CP-V ARI pela CBCA houve uma diminuição de 7,42% de expansão aos 16 dias e 2,08% aos 30 dias em relação à expansão média do CP0.

Ademais, a família de CP20 teve como expansão média 0,150% aos 16 dias e 0,255% aos 30 dias. Essas expansões médias também estão acima do limite previsto para a inibição, mas como na série de 10%, a substituição do cimento pela CBCA teve como resultado a diminuição da expansão média em relação ao CP0, sendo uma redução de 28,91% aos 16 dias e 28,98% aos 30 dias.

Por fim, a família de CP25 obteve como resultado expansões médias menores que o limite previsto para a inibição da RAA, 0,098% aos 16 dias e 0,170% aos 30 dias o que atesta que para o agregado utilizado na pesquisa, uma substituição de 25% do Cimento Portland pela CBCA, inibiria a possibilidade da manifestação da reação álcali-agregado.

Os resultados para a família de CP25 confirma o que foi encontrado por Saraiva (2017) e Kazmi et al. (2017), onde a adição de CBCA minimizou as expansões dos compósitos cimentícios em comparação aos corpos-de-prova de referência, que possuíam agregados reativos.

Saraiva (2017), ao analisar agregado de basalto, percebeu uma redução de 11,84% para a substituição de 10% de CBCA e de 35,53% para a substituição de 20% aos 32 dias. Quando o autor analisou o agregado de quartizito, a redução foi de 0,85% para a substituição de 10% de CBCA e de 12,07% para a substituição de 20% aos 32 dias. Em ambos os agregados, o autor não atingiu a expansão satisfatória para as substituições de 10 e 20% do cimento por CBCA. A expansão média satisfatória só foi atingida para a família de 30%.

Kazmi et al. (2017) obtiveram um resultado menor que o limite para a substituição de 20% em um agregado de calcário dolomítico do Paquistão, porém este resultado só foi satisfatório devido à menor reatividade desse agregado.

4 CONCLUSÃO

Com a finalização do trabalho, pode-se concluir que o propósito geral da pesquisa foi alcançado com uma redução da expansibilidade quanto à reação álcali-agregado das barras de argamassa com a substituição parcial do cimento por CBCA, mostrando assim a viabilidade do uso da CBCA na mitigação da RAA.

Quanto ao potencial inibidor da CBCA na reação álcali-agregado, pode-se concluir que a expansibilidade das argamassas produzidas (com 0, 10, 20% de substituição) não atingiu o limite de referência para inibição total da RAA. Apesar disso, a incorporação da cinza mitigou a RAA, reduzindo a expansão das argamassas em 7,42% aos 16 dias e 2,08% aos 30 dias para o CP10, e em 28,91% aos 16 dias e 28,98% aos 30 dias para o CP20, ambos em relação a CP0. Já substituição da cinza no percentual de 25% inibiu totalmente a possibilidade da manifestação da reação álcali-agregado.

Conclui-se também que, além da inibição da RAA, o uso da CBCA traz vantagens ambientais e sustentáveis. Segundo Savastano (2003), a utilização pela construção civil de resíduos gerados em outros setores da economia é vantajosa não apenas em virtude do aumento da atividade industrial e, conseqüentemente, de subprodutos, mas, sobretudo, devido à redução da disponibilidade de matérias-primas não renováveis, tão necessárias às atividades da construção civil convencional. Ele também afirma que grande parte dos resíduos gerados pode ser reciclado, reutilizado, transformado e incorporado, de modo a

produzir novos materiais de construção e atender à crescente demanda por tecnologia alternativa de construção mais eficiente, econômica e sustentável.

REFERÊNCIAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7389-2**: Agregados - Análise petrográfica de agregado para concreto Parte 2: Agregado graúdo. Rio de Janeiro: ABNT, 2009.

_____. **NBR 11579**: Cimento Portland — Determinação do índice de finura por meio da peneira 75 µm (nº 200). Rio de Janeiro: ABNT, 2013.

_____. **NBR 11582**: Cimento Portland - Determinação da expansibilidade Le Chatelier. Rio de Janeiro: ABNT, 2016.

_____. **NBR 11768**: Aditivos químicos para concreto de cimento Portland – Requisitos. Rio de Janeiro: ABNT, 2011.

_____. **NBR 15577**: Agregados – Reatividade álcali-agregado. Rio de Janeiro: ABNT, 2008.

_____. **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.

_____. **NBR 16606**: Cimento Portland — Determinação da pasta de consistência normal. Rio de Janeiro: ABNT, 2017.

_____. **NBR 16607**: Cimento Portland — Determinação dos tempos de pega. Rio de Janeiro: ABNT, 2017.

_____. **NBR 16697**: Cimento Portland - Requisitos. Rio de Janeiro: ABNT, 2018.

_____. **NM 14**: Cimento Portland - Análise química - Método de arbitragem para determinação de dióxido de silício, óxido férrico, óxido de alumínio, óxido de cálcio e óxido de magnésio. Rio de Janeiro: ABNT, 2012.

_____. **NM 15**: Cimento Portland - Análise química - Determinação de resíduo insolúvel. Rio de Janeiro: ABNT, 2012.

_____. **NM 16**: Cimento Portland - Análise química - Determinação de anidrido sulfúrico. Rio de Janeiro: ABNT, 2012.

_____. **NM 18**: Cimento Portland - Análise química - Determinação de perda ao fogo. Rio de Janeiro: ABNT, 2012.

_____. **NM 20**: Cimento Portland e suas matérias primas - Análise química - Determinação de dióxido de carbono por gasometria. Rio de Janeiro: ABNT, 2012.

_____. **NM 23**: Cimento Portland e outros materiais em pó – determinação da massa específica. Rio de Janeiro: ABNT, 2001.

ASTM INTERNATIONAL. **ASTM C1567-17**, Standard Test Method for Determining the Potential Alkali-Silica Reactivity of Combinations of Cementitious Materials and Aggregate (Accelerated Mortar-Bar Method). West Conshohocken, Pensilvânia: American Society for Testing and Materials, 2013. <https://doi.org/10.1520/C1567-13>

_____. **ASTM C618-17a**, Standard specification for coal fly ash and raw or calcined natural pozzolan for use in concrete. West Conshohocken, Pensilvânia: American Society for Testing and Materials, 2017. <https://doi.org/10.1520/C0618-17A>

_____. **ASTM C125-03**, Standard Terminology Relating to Concrete and Concrete Aggregates. West Conshohocken, Pensilvânia: American Society for Testing and Materials, 2003. <https://doi.org/10.1520/C0125-19>

BAHURUDEEN, A., KANRAJ, D., GOKUL DEV, V.; SANTHANAM, M. Performance evaluation of sugarcane bagasse ash blended cement in concrete. **Cement and Concrete Composites**, Barking, Inglaterra. v.59, p. 77-88, 2015. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2015.03.004>

BERENGUER, R. A. NOGUEIRA SILVA, F. A., MARDEN TORRES, S., BARRETO MONTEIRO, E. C. HELENE, P., DE MELO NETO, A.A. A influência das cinzas de bagaço de cana-de-açúcar como substituição parcial do cimento na resistência à compressão de argamassa. **Revista Alconpat**, Yucatán, México. v. 8, n. 1, p. 30-37, 2018. <http://dx.doi.org/10.21041/ra.v8i1.187>

CHUSILP, N., JATURAPITAKKUL, C., KIATTIKOMOL, K. Effects of LOI of ground bagasse ash on the compressive strength and sulfate resistance of mortars. **Construction and Building Materials**, Guildford, Inglaterra. v. 23, n. 12, p. 3523-3531, 2009. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2009.06.046>

CORDEIRO, G. C. **Utilização de cinzas ultrafinas do bagaço de cana-de-açúcar e da casca de arroz como aditivos minerais em concreto**. 2006. 445 p. Tese (Doutorado em Engenharia) – Universidade Federal do Rio de Janeiro. COPPE, Rio de Janeiro, 2006.p. 445.

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 Composites**, Barking, Inglaterra. v. 29, p. 269-275, 2016. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2016.08.020>

CORDEIRO, G. C., TOLEDO, R. D. FO AND FAIRBAIRN, E. M. R. Characterization of sugar cane bagasse ash for use as pozzolan in cementitious materials. **Química Nova**, São Paulo. v. 32, n. 1, p. 82-86, 2009. <http://dx.doi.org/10.1590/S0100-40422009000100016>

COSTA, L. F. (2017). **Estudo do bagaço da cana de açúcar como material para construção civil no estado de Pernambuco – sistema ternário com metacaulim e cal hidratada**. 2017. 83p. Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal de Pernambuco, Centro Acadêmico do Agreste, Caruaru, 2017.

FEDERAÇÃO DAS INDÚSTRIAS DO ESTADO DE SÃO PAULO **Outlook Fiesp 2023**: projeções para o agronegócio brasileiro, São Paulo, 2013. 115 p.

FERNANDES, I., BROEKMANS, M. A. T. M. Alkali-Silica Reactions: **An Overview. Part I. Metallography, Microstructure, and Analysis**. [s.l.]. v. 2, n. 4, p. 257-267, 2013. <https://doi.org/10.1007/s13632-013-0085-5>

FIGUEIRÔA, J., ANDRADE, T. **O ataque da reação Álcali-agregado sobre estruturas de concreto** – A descoberta pioneira do problema em fundações de ponte e edifícios na Região Metropolitana do Recife. 1. ed. Recife, Ed. Universitária da UFPE, 2007.

GANESAN, K., RAJAGOPAL, K., THANGAVEL, K. Evaluation of bagasse ash as supplementary cementitious material. **Cement and Concrete Composites**, Barking, Inglaterra. v. 29, n. 6, p. 515-524, 2007. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2007.03.001>

GÓES, P. B. B. **Análise da pozolanicidade por meio da difração de raio-x em pastas de cimento portland e com substituição por cinza do bagaço de cana-de-açúcar**. 2016. 90 f. Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal de Pernambuco, Centro Acadêmico do Agreste, Caruaru, Pernambuco, 2016.

HASPARYK, N. P. **Investigação de concretos afetados pela reação álcali-agregado e caracterização avançada do gel exsudado**. 2005. 326 f. Tese (Doutorado em Engenharia) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Escola de Engenharia, Porto Alegre, 2005.

KATARE, V., MADURWAR, M. V. Experimental characterization of sugarcane biomass ash – A review. **Construction and Building Materials**, Guildford, Inglaterra. v. 152, p. 1-15, 2017. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.06.142>

KAZMI, S. M. S., MUNIR, M. J., PATNAIKUNI, I., WU, YU-FEI. Pozzolanic reaction of sugarcane bagasse ash and its role in controlling alkali silica reaction. **Construction and Building Materials**, Guildford, Inglaterra. v. 148, p. 231-240, 2017. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.05.025>

OJEDA-FARÍAS, O., MENDOZA-RANGEL, J.M., BALTAZAR-ZAMORA, M. A. Influência da inclusão de cinzas do bagaço de cana-de-açúcar sobre a compactação, CBR e resistência à compressão de um material de granulometria fina. **Revista Alconpat**, Yucatán, México. z. 8, n. 2, p. 194 – 208, 2018. <http://dx.doi.org/10.21041/ra.v8i2.282>

POOLE, A. B. **Introduction, chemistry and mechanisms**. In: SIMS, I., POOLE A. Alkali-Aggregate Reaction in Concrete. Glasgow/London: Blackie / New York: Van Nostrand Reinhold, 1992, p.1-29.

RIBEIRO, D. V.; MORELLI, M.R. Effect of Calcination Temperature on the Pozzolanic Activity of Brazilian Sugar Cane Bagasse Ash (SCBA). **Materials Research**, São Carlos, v. 17, n. 4, p. 974-981, 2014. <https://doi.org/10.1590/S1516-14392014005000093>

SANDHU, R. K., SIDDIQUE, R. Influence of rice husk ash (RHA) on the properties of self-compacting concrete: A review. **Construction and Building Materials**, Guildford, Inglaterra. v. 153, p. 751-764, 2017. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.07.165>

SANTOS, J. V.; NAHIME, B. O; SANTOS, I. S.; BASILEIRO, K. P. T. V.; KUNAN, P. M.; LOBO, F. A. Efeitos da adição e substituição de cinza do bagaço da cana-de-açúcar em

matrizes cimentícias. **Brazilian Journal of Development**, Curitiba. v. 6, n. 10, p. 77494-77509, out. 2020. <https://doi.org/10.34117/bjdv6n10-250>

SARAIVA, S. L. C. **Estudo das reações álcali-agregado e das propriedades mecânicas de compósitos cimentícios com cinzas de bagaço de cana-de-açúcar.** 2017. 160 f. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto. 2017.

SAVASTANO, JR., WARDEN, P. G. Special theme issue: Natural fibre reinforced cement composites. **Cement & Concrete Composites.** Barking, Inglaterra. v. 25, n. 5, p. 517-624, 2003. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2004.09.014>

SILVA, D. L. **Avaliação das propriedades do concreto produzido com a cinza da queima do bagaço da cana-de-açúcar em substituição parcial do cimento Portland.** 2018. 82 f. Dissertação (Mestrado), Universidade de Pernambuco, Recife, 2018.

TAYLOR, H. F. W. *Cement chemistry.* 2. ed. Londres: Thomas Telford, 1997, p. 459.

TEODORO, P. E, FERREIRA, M. H. Q., CHARBEL, D. S., FORMAGINI, S., NEIVOCK, M. P. Estimativa da taxa de redução de CO₂ de concretos produzidos com cinzas resíduas de bagaço de cana-de-açúcar. **Revista de Ciências Exatas e Tecnologia,** Londrina. v. 8, n. 8, p. 173-179, 2013.

THOMAS, M. The effect of supplementary cementing materials on alkali-silica reaction: a review. **Cement and Concrete Research.** Elmsford, Nova York. v. 41, n. 12, p. 1224-1231, 2011. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2010.11.003>