

CENTRO UNIVERSITÁRIO DE ANÁPOLIS – UNIEVANGÉLICA
CAMPUS CERES
CURSO DE ENGENHARIA CIVIL

ANA PAULA SOUSA RODRIGUES
SOLIMAR SOARES DE ALMEIDA

**AVALIAÇÃO DA ATIVIDADE POZOLÂNICA DA CINZA DO BAGAÇO DE CANA-
DE-AÇÚCAR DO VALE DO SÃO PATRÍCIO - GOIÁS**

PUBLICAÇÃO Nº:

CERES / GO
2020

**ANA PAULA SOUSA RODRIGUES
SOLIMAR SOARES DE ALMEIDA**

**AVALIAÇÃO DA ATIVIDADE POZOLÂNICA DA CINZA DO BAGAÇO DE CANA-
DE-AÇÚCAR DO VALE DO SÃO PATRÍCIO - GOIÁS**

PUBLICAÇÃO Nº:

**TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO SUBMETIDO AO CURSO DE
ENGENHARIA CIVIL DA UNIEVANGÉLICA.**

ORIENTADOR: VILSON DALLA LIBERA JUNIOR

CERES / GO: 2020

FICHA CATALOGRÁFICA

RODRIGUES, Ana Paula Sousa; ALMEIDA, Solimar Soares de.

Avaliação da atividade pozolânica da cinza do bagaço de cana-de-açúcar do vale do São Patrício – Goiás, 2020.

xi, 27P, 297 mm (UniEVANGÉLICA, Bacharel, Engenharia Civil, 2020).

TCC - UniEVANGÉLICA

Curso de Engenharia Civil.

1. Cinza

2. Bagaço de cana de açúcar

3. Pozolana

4. Material cimentício

I. ENC/UNI

II. Título (Série)

REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA

RODRIGUES, A. P. S; ALMEIDA, S. S. Avaliação da atividade pozolânica da cinza do bagaço de cana-de-açúcar do vale do São Patrício - Goiás. TCC, Publicação ENC. PF-001A/07, Curso de Engenharia Civil, UniEVANGÉLICA, Anápolis, GO, 27p. 2020.

CESSÃO DE DIREITOS

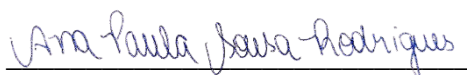
NOME DO AUTOR: Ana Paula Sousa Rodrigues; Solimar Soares de Almeida.

TÍTULO DA DISSERTAÇÃO DE TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO: Avaliação da atividade pozolânica da cinza do bagaço de cana-de-açúcar do vale do São Patrício - Goiás.

GRAU: Bacharel em Engenharia Civil

ANO: 2020

É concedida à UniEVANGÉLICA a permissão para reproduzir cópias deste TCC e para emprestar ou vender tais cópias somente para propósitos acadêmicos e científicos. O autor reserva outros direitos de publicação e nenhuma parte deste TCC pode ser reproduzida sem a autorização por escrito do autor.



Ana Paula Sousa Rodrigues

76300-000 Ceres – GO

E-mail: paulinha130298@gmail.com



Solimar Soares de Almeida

76304-000 Ipiranga de Goiás - GO

E-mail: solimar779@gmail.com

**ANA PAULA SOUSA RODRIGUES
SOLIMAR SOARES DE ALMEIDA**

**AVALIAÇÃO DA ATIVIDADE POZOLÂNICA DA CINZA DO BAGAÇO CANA-DE-
AÇÚCAR DO VALE DO SÃO PATRÍCIO - GOIÁS**

**TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO SUBMETIDO AO CURSO DE
ENGENHARIA CIVIL DA UNIEVANGÉLICA COMO PARTE DOS REQUISITOS
NECESSÁRIOS PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE BACHAREL.**

APROVADO POR:

Vilson Dalla Libera Junior

**VILSON DALLA LIBERA JUNIOR, Mestre (Centro Universitário de Anápolis –
UniEVANGÉLICA, Campus Ceres)
(ORIENTADOR)**

Janaína Mônica de Oliveira Sousa

**JANAÍNE MÔNICA DE OLIVEIRA SOUSA, Mestre (Centro Universitário de Anápolis
– UniEVANGÉLICA, Campus Ceres)
(EXAMINADOR INTERNO)**

LUIZ TOMAZ DE AQUINO NETO

**LUIZ TOMAZ DE AQUINO NETO, Especialista (Centro Universitário de Anápolis –
UniEVANGÉLICA, Campus Ceres)
(EXAMINADOR INTERNO)**

DATA: CERES/GO, 09 DE DEZEMBRO DE 2020

AVALIAÇÃO DA ATIVIDADE POZOLÂNICA DA CINZA DO BAGAÇO DE CANA-DE-AÇÚCAR DO VALE DO SÃO PATRÍCIO - GOIÁS

Ana Paula Sousa Rodrigues¹

Solimar Soares de Almeida²

Vilson Dalla Libera Junior³

RESUMO

Devido ao grande aumento de consumo de cimento Portland no Brasil e sua alta emissão de CO₂ na atmosfera durante a produção do clínquer, diversas pesquisas sobre a utilização de resíduos agroindustriais para produção de materiais utilizados na construção civil têm sido desenvolvidas. Entre os materiais alternativos utilizados em matrizes cimentícias destaca-se a cinza do bagaço de cana-de-açúcar (CBC). Nesse contexto, este trabalho buscou determinar a atividade pozolânica da CBC da região do Vale do São Patrício - GO, visando sua utilização como material cimentício suplementar. Inicialmente, a cinza e os agregados foram secos em estufas e realizou-se análise granulométrica. Em seguida, determinou-se a umidade da cinza e sua perda de massa na ignição. A composição química da CBC, cimento e pastas de cimento de cada traço foi avaliada através de FTIR. Produziu-se 5 traços substituindo o cimento pela CBC em teores de 0, 5, 10, 15 e 20%. A caracterização mecânica da argamassa foi realizada através do ensaio de resistência à compressão simples. A CBC apresentou 0,3 % de umidade e 31,1% de perda de massa na ignição. Os resultados da análise de FTIR indicaram que embora a CBC não possui, grandes níveis de reatividade, pode-se encontrar uma quantidade significativa de sílica amorfa, proporcionando o uso da mesma como material pozolânico na substituição parcial do cimento Portland. O ensaio de consistência e tempo de pega indicou a perda de plasticidade ao substituir o cimento por cinza. O ensaio de resistência à compressão e teste de Tukey declararam a eficiência dos traços CBC 5 e CBC 10. Os corpos de prova que possuem maiores teores de cinza absorveram mais água, indicando que a cinza possui tendências hidrofílicas. Por fim, a CBC provou-se viável quando usada em pequenas quantidades, visto que pode reduzir custos e impactos ambientais.

Palavras-chave: Cinza. Bagaço de cana-de-açúcar. Pozolana. Material cimentício

¹ Discente do curso de Engenharia Civil do Centro Universitário de Anápolis (UniEVANGÉLICA) – Campus Ceres. E-mail: paulinha130298@gmail.com

² Discente do curso de Engenharia Civil do Centro Universitário de Anápolis (UniEVANGÉLICA) – Campus Ceres. E-mail: solimar779@gmail.com

³ Mestre em Integridade de Materiais da Engenharia, Professor do curso de Engenharia Civil do Centro Universitário de Anápolis (UniEVANGÉLICA) – Campus Ceres. E-mail: vilson.dalla@gmail.com

SUMÁRIO

| | | |
|------------|---|-----------|
| 1 | INTRODUÇÃO | 5 |
| 2 | REVISÃO BIBLIOGRÁFICA | 6 |
| 2.1 | Materiais cimentícios | 6 |
| 2.1.1 | <i>Cimento Portland</i> | 6 |
| 2.1.2 | <i>Materiais cimentícios suplementares</i> | 6 |
| 2.2 | Cana-de-açúcar | 8 |
| 2.2.1 | <i>Resíduos da cana, origem e características da cinza</i> | 8 |
| 2.2.2 | <i>Aplicação da CBC em compósitos cimentícios</i> | 9 |
| 3 | MATERIAL E MÉTODOS | 10 |
| 3.1 | Materiais | 10 |
| 3.1.1 | <i>Cimento e água</i> | 10 |
| 3.1.2 | <i>Agregados</i> | 10 |
| 3.1.3 | <i>Cinza do bagaço de cana-de-açúcar</i> | 11 |
| 3.2 | Caracterização CBC | 11 |
| 3.2.1 | <i>Moagem e análise granulométrica</i> | 11 |
| 3.2.2 | <i>Umidade e perda de massa na ignição</i> | 11 |
| 3.2.3 | <i>Espectroscopia no infravermelho por transformada de Fourier (FTIR)</i> | 12 |
| 3.3 | Determinação da pasta de consistência normal | 12 |
| 3.4 | Dosagem e produção de argamassa | 13 |
| 3.5 | Ensaio de compressão | 13 |
| 3.6 | Absorção de água | 14 |
| 4 | RESULTADOS E DISCUSSÃO | 14 |
| 4.1 | Análise das propriedades físicas da CBC | 14 |
| 4.2 | Análise FTIR da CBC, cimento e pastas de cimento | 15 |
| 4.3 | Tempo de pega das pastas de cimento | 17 |
| 4.4 | Propriedades físicas e mecânicas das argamassas | 17 |
| 4.5 | Absorção de água | 20 |
| 5 | CONSIDERAÇÕES FINAIS | 22 |
| | REFERÊNCIAS | 23 |

1 INTRODUÇÃO

Devido à crescente industrialização e urbanização, o material mais produzido e consumido no setor da construção civil atualmente é o concreto, visto que, possui fácil produção e boa flexibilidade de aplicação (MEHTA e MONTEIRO, 2014). O principal elemento do concreto é o cimento Portland, e sua produção gera problemas ambientais na extração de matéria-prima e na emissão de gases que contribuem para o efeito estufa (COSTA e MASCOLO, 2015). A ação poluidora desenvolve-se ao produzir o clínquer, componente do cimento, pois durante a queima do calcário a fim de obter o óxido de cálcio, é liberada uma alta quantidade de CO₂ na atmosfera (TEODORO *et al.*, 2013).

Diante da constante preocupação da redução do uso de matérias-primas não renováveis, visando a sustentabilidade ambiental, diversas pesquisas sobre a utilização de resíduos provenientes de processos agroindustriais para produção de materiais utilizados na construção civil têm sido desenvolvidas. Esses resíduos devem possuir potencial pozolânico, para atuar como materiais cimentícios suplementares, substituindo parcialmente o cimento Portland, sem prejudicar o desempenho mecânico, a fim de reduzir componentes que degradam o meio ambiente, e utilizar produtos naturais que seriam descartados (CARMO *et al.*, 2019).

Entre os materiais alternativos utilizados em matrizes cimentícias destaca-se a cinza do bagaço de cana-de-açúcar (CBC), cinza da folha da bananeira, cinza da casca de arroz, resíduo cerâmico moído, borracha de pneus usados, entre outros. A produção de cana-de-açúcar apresenta um alto índice de crescimento no Brasil e no estado de Goiás, visto que a região do Vale de São Patrício possui uma elevada produção de cana-de-açúcar. Após extrair o caldo na moagem da cana, seu bagaço é queimado, e suas cinzas podem ser consideradas uma opção como subproduto na produção do concreto (CABRAL e AZEVEDO, 2016).

Dentro da matriz energética o bagaço tem o seu aproveitamento como combustível das caldeiras, gerando vapor para aquecimento da destilação do etanol e para geração de energia elétrica para consumo próprio das usinas e até mesmo para as concessionárias de energia elétrica. A cinza de bagaço de cana é um subproduto da sobra do procedimento de fabricação de açúcar e etanol. Rica em SiO₂ e sílica amorfa, apresenta potencial para ser utilizada como adição mineral, podendo substituir em parte o cimento Portland na produção de concreto e argamassas (CORDEIRO *et al.*, 2008).

Além de uso na aplicação de fertilizante, pode-se reciclar a cinza de bagaço de cana-de-açúcar para produzir material vitrocerâmico com a volastonita, como fase principal de (45 e 40% em peso) cinza do bagaço da cana, juntamente com calcário (45 e 50% em peso) e agente de fluxo (K₂CO₃, 10% em peso). As propriedades do concreto podem ser melhoradas, e as justificativas para o aumento dessa resistência é a adição de CBC (TEIXEIRA *et al.*, 2008).

Por conter um significativo teor de sílica amorfa, finura, área superficial específica, grau de reatividade, reação pozolânica, hidróxido de cálcio, (GANESAN *et al.*, 2007) e Sílica mesoporosa com estrutura de poros controlada (RAHMAN *et al.*, 2015), a CBC ocasiona um aumento gradativo na resistência à compressão de até 20% na substituição parcial do cimento. Nas cinzas podem ser encontradas composições de alumínio, ferro, alcalinas e terra alcalina, combinações que podem ser feitas com argilas que promove a formação de argilas cerâmicas de melhor qualidade (TEIXEIRA *et al.*, 2008).

Diversos estudos apontam o potencial da CBC como material cimentício suplementar na produção de concretos, argamassa e pastas, pois o uso da cinza proporciona redução de custos, proteção ambiental e conservação de recursos naturais. No entanto, existem poucas pesquisas sobre as características químicas e físicas da cinza do bagaço da cana-de-açúcar no estado de Goiás. Nesse contexto, este trabalho busca determinar a atividade pozolânica da CBC da região do Vale do São Patrício - GO, visando sua utilização como material cimentício suplementar.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Materiais cimentícios

2.1.1 Cimento Portland

O cimento é considerado o material mais importante na construção civil, pois é o principal componente da argamassa e do concreto. De acordo com a NBR 16697 (ABNT, 2018), obtém-se o cimento Portland através da moagem de clínquer, produto constituído em sua maior parte por silicatos de cálcio com propriedades hidráulicas, é permitido adicionar também à mistura materiais carbonáticos, materiais pozolânicos e/ou escórias granuladas de alto-forno.

O cimento é um material seco quimicamente ativo, pois quando combinado com água apresenta propriedades ligantes devido à sua constituição, sendo capaz de unir os agregados que são materiais inertes. Adquire resistência mecânica após um período de cura, e resistência à água após ser hidratado, considerado então um aglomerante hidráulico (MEHTA e MONTEIRO, 2014).

2.1.2 Materiais cimentícios suplementares

2.1.2.1 Definição e tipos

Em razão das consequências causadas pela extração de matérias-primas e a produção do clínquer, como desmatamento, emissão de gás carbono e elevado consumo energético, em muitos países são utilizados resíduos industriais como adição ao cimento. Subprodutos que seriam descartados em locais inadequados podem ser reaproveitados, resultando em benefícios ambientais e econômicos (ISAIA, 2011).

Algumas adições são denominadas como materiais cimentícios suplementares (MCS), são adicionadas ao produzir argamassa ou concreto, substituindo uma porcentagem do cimento, afim de reduzir o consumo do clínquer, que acarreta prejuízos ambientais ao produzi-lo, e resulta em melhores características dos materiais cimentícios (LOTHENBACH *et al.*, 2011). Esses materiais devem possuir atividade pozolânica, e é importante que apresentem viabilidade econômica, técnica e sejam abundantes na natureza (ABRÃO e JOHN 2019). Como exemplo de MCS pode-se citar os de origem industrial como cinza volante, sílica ativa, e metacaulim, resíduos agrícolas como cinza do bagaço da cana-de-açúcar e cinza de casca de arroz, e também resíduos cerâmicos (MARTINS e MEDEIROS, 2018).

2.1.2.2 Reação pozolânica

A atividade pozolânica da cinza pode ser definida como um sistema composto por água, cal e pozolana, na qual em uma temperatura ambiente gera instabilidade e diversas reações, e posteriormente há o endurecimento desse sistema, bem como a elevação da resistência mecânica. Ao substituir o cimento Portland parcialmente por pozolana, percebe-se a capacidade de manter ou até mesmo aumentar a resistência mecânica e durabilidade dos materiais cimentícios (COSTA e MASCOLO, 2015).

Os materiais pozolânicos apresentam características aglomerantes na presença do cimento, pois há compatibilidade na reação com o Hidróxido de Cálcio (CH^+), ocasionado pelo comportamento dos silicatos em meio aquoso, gerando compostos estáveis devido à produção extra de silicatos de cálcio hidratados (C-S-H) (CASTRO *et al.*, 2008). As reações da pozolana e do clínquer ocorrem em diferentes momentos da hidratação da pasta de cimento, pois a pozolana reage de forma mais lenta, iniciando de 7 a 15 dias depois de iniciar a hidratação do clínquer (METHA e MONTEIRO, 2008).

A adição pozolânica gera alguns efeitos na pasta de cimento. Um deles é o efeito microfíler, o qual as micropartículas preenchem os vazios das partículas de areia e cimento. Acontece também o refinamento das dimensões dos grãos e da estrutura dos poros, pois os vazios que há entre os grãos do cimento são reduzidos e geram vários cristais de dimensões reduzidas. Ocorre também alteração da microestrutura da zona de transição, pois a água acumulada que não foi combinada quimicamente enfraquece a zona de transição entre a pasta e o agregado. Com a adição pozolânica esse acúmulo hídrico é reduzido ocasionando elevação da resistência mecânica do concreto (ISAIA, 2011).

2.1.2.3 Determinação da atividade pozolânica

Há diversos métodos que determinam a atividade pozolânica de uma matéria, os físicos, que mensuram parâmetros de resistência mecânica e os químicos, como os métodos de Fratini, Chapelle modificado e o de Lúxan, que caracterizam a atividade pozolânica, respectivamente na definição da quantidade máxima de hidróxido de cálcio, o teor de óxido de cálcio e conceitos de condutividade elétrica em soluções resultantes em hidróxido de cálcio, desse modo, analisando a reação química. Os métodos físicos determinam o seu índice com cimento Portland, a partir da determinação da resistência à compressão. Sendo assim, a resistência mecânica associa-se com a relação água/aglomerante e o preenchimento dos espaços porosos com produto de hidratação, e sua variação influencia a possível atividade pozolânica (WEBER *et al.*, 2001; SOARES *et al.*, 2015).

Para os métodos químicos não é necessário acompanhar o desenvolvimento da reação pozolânica, obtendo resultados rápidos correlacionados aos experimentos de resistência mecânica. Desta forma é interessante utilizar os ensaios mecânicos e químicos, de forma conjunta, para obter análises a curto e longo prazo (VASCONCELOS *et al.*, 2013).

2.2 Cana-de-açúcar

2.2.1 Resíduos da cana, origem e características da cinza

Atualmente o bagaço de cana-de-açúcar é um dos principais subprodutos gerado pela indústria sucroalcooleira. A tabela 1 apresenta os principais resíduos produzidos a partir da fabricação do álcool e do açúcar.

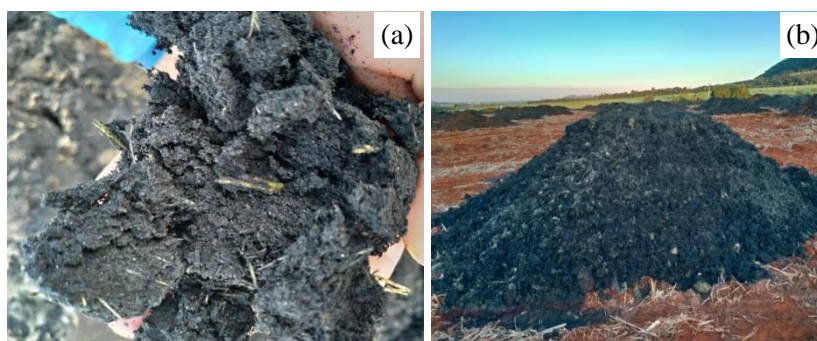
Tabela 1 – Resíduos gerados pela cana-de-açúcar.

| Tipo de Resíduo | Origem | Destino |
|--------------------|--|--|
| Bagaço | Extração do caldo | - Cogeração de energia elétrica - Uso como adubo - Produção de celulose - Produção de ração animal - Produção de aglomerados |
| Torta de Filtração | Filtração do lodo gerado na clarificação | - Uso como condicionador do solo - Produção de ração animal |
| Vinhoto/Vinhaça | Queima do bagaço para cogeração de energia | - Uso como fertilizante |
| Melaço | Fabricação do açúcar | - Usado na produção do álcool |
| CBC | Queima do bagaço para cogeração de energia | - Adubação do solo |

Fonte: Adaptado de FREITAS et al. (2005).

Como fonte principal de energia para as caldeiras, a queima do bagaço de cana-de-açúcar é realizada de forma muito rápida. A queima do bagaço em uma temperatura superior a 600° C permite o surgimento de outro subproduto, conhecido como cinza residual do bagaço de cana (CBC) (Figura 1). Estima-se que para cada tonelada de bagaço queimado gera em torno de 25 kg de cinzas. Atualmente na indústria sucroalcooleira o destino final desse subproduto são as lavouras como fonte de adubo (CORDEIRO *et al*, 2006; SESSA *et al.*, 2013).

Figura 1 – CBC após a queima (a). Uso da CBC nas lavouras (b).



Fonte: Próprio autor (2020).

Alguns fatores como a temperatura e o tempo de queima do bagaço, determinam o teor de carbono remanescente na CBC. De certa forma, o teor de carbono pode ser medido por meio do ensaio de perda ao fogo, conforme o ensaio realizado com o cimento Portland, baseado na norma NBR NM 18 (ABNT, 2012). A Tabela 2 apresenta as composições químicas da cinza,

que, quando moída para uma redução do tamanho das partículas, pode apresentar um bom desempenho de atividade pozolânica. Por apresentar significantes características confirmadas através de estudos, a produção de argamassas e concretos pode-se utilizar a cinza de bagaço de cana-de-açúcar na substituição parcial do cimento Portland (NUNES *et al.*, 2010; RODRIGUES *et al.*, 2013).

Tabela 2 – Composição química % em massa, em termos de óxidos, da cinza do bagaço produzida a 600 °C.

| Composição Química | ARIF <i>et al.</i> (2016) | BAHURUDE N <i>et al.</i> (2015) | CORDEIRO <i>et al.</i> (2009) | JIMENÉNEZ-QUERO <i>et al.</i> (2012) | SOARES <i>et al.</i> (2015) |
|-------------------------------------|---------------------------|---------------------------------|-------------------------------|--------------------------------------|-----------------------------|
| SiO₂ | 78,50 | 72,95 | 60,96 | 56,37 | 72,3 |
| Al₂ O₃ | 7,27 | 1,68 | 0,09 | 14,61 | 5,52 |
| Fe₂ O₃ | 3,85 | 1,89 | 0,09 | 5,04 | 10,08 |
| CaO | 1,28 | 7,77 | 5,97 | 2,36 | 1,57 |
| Na₂ O | 0,697 | - | 0,70 | 1,57 | - |
| K₂ O | 1,41 | 9,28 | 9,02 | 3,29 | - |
| MnO | - | - | 0,48 | 0,18 | - |
| MgO | 1,28 | 1,98 | 8,65 | 1,43 | 1,13 |
| P₂ O₅ | - | - | 8,34 | 0,85 | 1,11 |
| LOI | - | - | 5,70 | 10,53 | 1,52 |

2.2.2 Aplicação da CBC em compósitos cimentícios

Alguns estudos comprovam que a CBC apresenta um grande potencial em sua composição química, no qual proporciona o uso como aditivo mineral, principalmente quando se refere aos teores de dióxido de silício e perda ao fogo. Porém, a granulometria da cinza, interfere diretamente na obtenção de resultados, no qual aponta a necessidade de moagem para elevar a reatividade. (CORDEIRO *et al.*, 2006; SANTOS e BAÊTA 2013).

Segundo Jiménez-Quero *et al.* (2012), o uso da cinza do bagaço de cana e da cinza volante, influencia no comportamento reológico das pastas de cimento e perda de fluidez. A forma e o tamanho das partículas da CBC usada, para produzir a pasta e a argamassa, aumentou significativamente a viscosidade, tornando a amostra mais viscosa e plástica e com aumento na tensão de escoamento superior da mistura sem adição da cinza, aumentando positivamente na resistência à compressão aos 3 dias, quando comparado ao traço sem adição da cinza, tornando possível o uso em teores acima de 25% (BAHURUDEEN *et al.*, 2015). Com 28 dias a amostra com teor de 20% atingiu um significativo aumento na resistência à compressão (CHUSILP *et al.*, 2009) ultrapassando 40 MPA, com o uso de superplastificante (ARIF *et al.*, 2016).

De acordo com Rerkpiboon *et al.* (2015), na amostra com 50% de adição de CBC como cimento Portland, a resistência à compressão do concreto foi atingida em pelo menos 90% do concreto de controle após 28 dias de cura. Vale ressaltar que a incorporação da CBC na mistura de argamassa ou concreto aumenta a necessidade de água devido à presença de partículas fibrosas.

A utilização da CBC como parte do material cimentício suplementar na confecção de concretos e argamassas, apresenta várias vantagens. Além das vantagens já confirmadas por estudos, a CBC tem uma importante contribuição na redução de emissões de CO₂, pois sua obtenção requer menos energia do que a obtenção do clínquer, podendo contribuir para que as indústrias de cimento possam fabricar produtos mais sustentáveis garantindo uma boa qualidade do meio ambiente (DWIVEDI *et al.*, 2006).

3 MATERIAL E MÉTODOS

3.1 Materiais

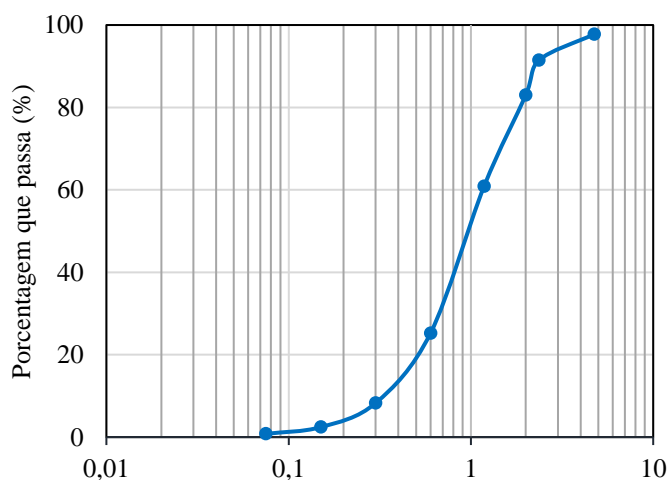
3.1.1 Cimento e água

O cimento utilizado foi do tipo CP II-F-32, disponibilizado pelo Laboratório de Materiais de Construção do Centro Universitário de Anápolis – UniEVANGÉLICA, Campus Ceres. Segundo a NBR 16697 (ABNT, 2018), o CP II-F é composto com material carbonático. A água potável empregada para o preparo das argamassas foi proveniente do abastecimento público da cidade de Ceres, Goiás, Brasil.

3.1.2 Agregados

Os agregados utilizados são do tipo miúdo, areia de origem natural disponibilizada pelo Laboratório de Materiais de Construção do Centro Universitário de Anápolis – UniEVANGÉLICA, Campus Ceres. Inicialmente, os agregados foram secos em estufa à 105 °C durante 24 horas. Em seguida foi realizada a composição granulométrica com peneiramento através da série normal segundo a NBR NM 248 (ABNT, 2003), conforme apresenta a Figura 2.

Figura 2 – Curva granulométrica da areia estudada.



Fonte: Próprio autor (2020).

A areia foi identificada como média fina conforme NBR NM 248 (ABNT, 2003). Devido as características da areia utilizada, foi necessário a separação em frações conforme

recomenda a NBR 7215 (ABNT, 2019), sendo elas: fração grossa (1.18 mm), média grossa (600 µm), média fina (300 µm) e fina (150 µm) para dosagem das argamassas. Na figura a seguir é possível ver as quatro frações da areia.

Figura 3 – Frações da areia. Esquerda para direita: fração grossa, média grossa, média fina e fina.



Fonte: Próprio autor (2020).

3.1.3 Cinza do bagaço de cana-de-açúcar

A cinza foi disponibilizada pela Cooperativa Agroindustrial de Rubiataba, conhecida como Usina Cooper-Rubi, localizada na Zona Rural da cidade de Rubiataba, Goiás, Brasil, a qual sua atividade principal é a produção de álcool. A CBC foi disponibilizada úmida, apresentava resíduos de bagaços não queimados e partículas desconhecidas.

3.2 Caracterização CBC

3.2.1 Tratamento e análise granulométrica

As cinzas do bagaço de cana-de-açúcar foram colocadas em estufa durante 24 horas a 105 °C para eliminar a umidade presente. Foi feito peneiramento da cinza e coletou-se a porção passante na peneira de 150 µm, nomeando-a como cinza tratada. Depois foi feita a análise granulométrica da cinza *in natura* e da cinza peneirada seguindo a NBR NM 248 (ABNT, 2003). Para a execução dos ensaios de granulometria utilizou-se o conjunto de peneiras da série normal disponíveis no Laboratório de Materiais de Construção do Centro Universitário de Anápolis – UniEVANGÉLICA, Campus Ceres.

3.2.2 Umidade e perda de massa na ignição

A identificação da umidade da cinza tratada foi realizada com o intuito de verificar se a CBC estudada apresenta as características descritas na norma C618 (ASTM, 2019), a qual determina que a CBC deve estar em umidade máxima igual a 3% no momento da dosagem. Inicialmente, uma amostra de 10 g de CBC foi pesada e seca em estufa (AMC) durante 24 horas a uma temperatura de 105 °C, em seguida, resfriada até atingir a temperatura ambiente e pesada novamente. A umidade total será calculada conforme a equação 1.

$$Mm = \frac{Mu - Ms}{Ms} \times 100 \quad (1)$$

Onde, M_m = Massa da amostra (g); M_u = Massa do cadinho com a amostra antes da ignição (g); M_s = Massa do cadinho com a amostra depois da ignição (g).

Após a etapa de secagem, foi calculada a perda de massa na ignição. Primeiramente o material tratado foi pesado, com uma quantidade aproximada de 10 g da amostra sem tratamento adicional, de forma exata e em cadinho de porcelana previamente aquecido a 700 °C, esfriado em dessecador e tarado. Posteriormente, a amostra foi distribuída o mais uniforme possível, vibrando levemente o cadinho afim de formar uma camada com espessura constante. A amostra foi aquecida em uma temperatura de 700 °C, e mantida em isoterma durante 2 horas. Posteriormente o cadinho foi retirado do equipamento e colocado em um dessecador até que atingisse a temperatura ambiente e depois pesado.

3.2.3 Espectroscopia no infravermelho por transformada de Fourier (FTIR)

Os espectros de FTIR da CBC, cimento e pastas de cimento de cada traço foram estudados com o intuito de avaliar a composição química dos materiais. Utilizou-se espectrômetro Nicolet iS10 (Thermo Scientific) disponível no Laboratório de Análise da Universidade de Brasília – UnB e utilizando a técnica de transmissão com resolução de 4 cm^{-1} e 64 varreduras entre 4000 a 400 cm^{-1} . Pastilhas de KBr foram preparadas com 5% m/m de amostra em relação ao KBr. A aquisição e manipulação de dados foi realizada utilizando o software OMNIC.

3.3 Determinação da pasta de consistência normal

Para determinar o início e fim de tempo de pega, foi utilizado a NBR 16606 (ABNT, 2018). Utilizou-se o misturador, e fez-se uma batida para cada traço. A quantidade de cimento foi de 500 g, como especificado em norma, sendo substituído parcialmente pela porcentagem de cinza de cada traço. A quantidade de água, como a norma sugere foi determinada por tentativas, dessa forma, foi necessário aumentar a relação água/cimento conforme aumentou o teor de cinzas. As misturas foram colocadas em moldes, e posicionadas sob o aparelho de Vicat. Foi feito a medida a cada 10 minutos, até atingir o tempo de fim de pega. A tabela 3 a seguir apresenta a quantidade de materiais utilizados em cada traço.

Tabela 3 – Materiais para ensaio de determinação da pasta de consistência.

| Traço | Cimento (g) | CBC (g) | Água (g) | Relação A/C |
|--------|-------------|---------|----------|-------------|
| CBC 0 | 500 | 0 | 165 | 0,33 |
| CBC 5 | 475 | 25 | 165 | 0,33 |
| CBC 10 | 450 | 50 | 195 | 0,39 |
| CBC 15 | 425 | 75 | 200 | 0,4 |
| CBC 20 | 400 | 100 | 220 | 0,44 |

Fonte: Próprio autor (2020).

3.4 Dosagem e produção de argamassa

Foram produzidos 5 traços com substituição de 0, 5, 10, 15 e 20% em massa do cimento pela CBC. Dessa forma, para diferenciar os grupos, adotou-se nomenclatura para cada porcentagem de substituição de cimento, sendo eles: CBC 0, CBC 5, CBC 10, CBC 15 E CBC 20. Para a composição dos traços seguiu-se a NBR 7215 (ABNT, 2019) e a distribuição dos materiais foi realizada conforme apresentado na tabela 4. A relação água/cimento recomendada por essa norma é de 0,53, porém no traço CBC 20, que possui teor de cinza elevado, foi necessário aumentar essa relação para a produção da mistura. Após a produção, ainda conforme a NBR 7215 (ABNT, 2019), fez-se o ensaio de consistência e depois os corpos de prova cilíndricos de argamassa foram moldados, contendo dimensões de 10 x 5 cm no Laboratório de Materiais de Construção do Centro Universitário de Anápolis – UniEVANGÉLICA, Campus Ceres. A norma recomenda que os corpos de prova permaneçam nos moldes para cura inicial durante 24 horas, porém visando obter uma melhor cura e desmoldagem foi decidido desmoldar após 48 horas. Após serem desenformados, foram submergidos em tanque de água não corrente para cura úmida, retirados na data do ensaio.

Tabela 4 - Classificação dos corpos de prova.

| Traço | Cimento (g) | CBC (g) | Agregado (g) | Água (g) | Relação A/C |
|--------|-------------|---------|--------------|----------|-------------|
| CBC 0 | 624 | - | 1872 | 330 | 0,53 |
| CBC 5 | 592,8 | 31,2 | 1872 | 330 | 0,53 |
| CBC 10 | 561,6 | 62,4 | 1872 | 330 | 0,53 |
| CBC 15 | 530,4 | 93,6 | 1872 | 330 | 0,53 |
| CBC 20 | 468 | 156 | 1872 | 401,2 | 0,64 |

Fonte: Próprio autor (2020).

Na Figura 4 a seguir é possível observar os quatro corpos de prova de cada um dos 5 traços, moldados nos moldes cilíndricos, e colocados em descanso por 48 horas para cura inicial.

Figura 4 – Corpos de prova moldados.



Fonte: Próprio autor (2020).

3.5 Ensaio de compressão

A caracterização mecânica da argamassa foi realizada através do ensaio de resistência à compressão simples conforme a NBR 5739 (ABNT, 2018), realizado na Máquina Universal de

Ensaio Mecânico CONTECO disponível no Laboratório de Materiais e Estruturas do Centro Universitário de Anápolis – UniEVANGÉLICA. Foram rompidos 4 corpos de prova para cada traço e para cada idade, de 7 e 28 dias, totalizando em 40. Os resultados coletados dos ensaios mecânicos foram interpretados através de análise estatística ANOVA através do software Origin 2019 Pro.

3.6 Absorção de água

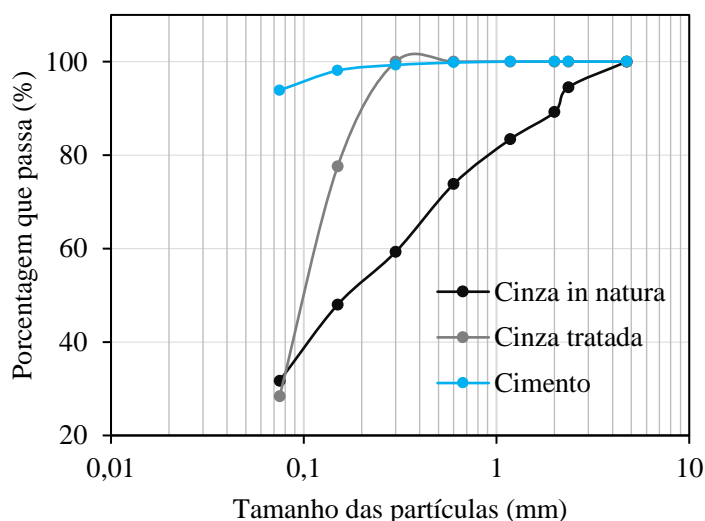
A análise foi realizada obedecendo a NBR 9778 (ABNT, 2005), pelo teste de determinação de absorção de água através de imersão. No ensaio, inicialmente foi determinada a massa do corpo-de-prova antes de colocá-lo para cura úmida, durante o tempo de cura, a cada 7 dias os corpos de prova foram retirados da água, secados previamente com papel toalha e pesados visando obter sua massa atual, em seguida imersos novamente em água. Ao final, os dados da massa em diferentes dias foram tabelados e calculados os valores totais de absorção.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 Análise das propriedades físicas da CBC

A Figura 5 a seguir apresenta a distribuição granulométrica realizada por ensaio de peneiramento através da série normal do cimento, cinza *in natura* e cinza tratada.

Figura 5 – Curvas granulométricas da cinza *in natura*, cinza tratada e cimento.



Fonte: Próprio autor (2020).

Visando aproximar os parâmetros da cinza aos do cimento, obtendo sucesso na substituição parcial, a granulometria de ambos deve ser semelhante. Ao estudar as composições granulométricas na Figura 5, nota-se uma considerada discrepância entre a curva da cinza *in natura* em comparação ao cimento, obtendo um módulo de finura maior, sendo de 3,2, enquanto do cimento é 1,09.

Em busca de aproximar o módulo de finura da cinza ao do cimento e obter uma granulometria mais fina, foi realizado o peneiramento, e a cinza tratada resultou em um módulo de finura de 1,7, assemelhando sua curva à do cimento. A granulometria é uma característica muito importante a ser observada, pois segundo Mehta e Monteiro (2014), ela determina o efeito pozolânico das cinzas em compósitos cimentícios.

Quanto à finura, a C618 (ASTM, 2019) afirma que ao fazer a granulometria da cinza tratada, deve ficar retido na peneira de 45 μm no máximo 34%. Esta análise foi realizada em laboratório, utilizando uma peneira de 75 μm , menor série disponível em laboratório. Após o peneiramento observou-se que quase toda a cinza ficou retida antes da peneira de 75 μm , não estando dentro dos parâmetros para ser considerada pozolânica. Segundo Isaia e Helene (1995), o módulo de finura influencia, porque quanto menor a granulometria, maior será a sua reatividade, porque a superfície de interação entre a água, cimento e cinza será maior, por isso a norma exige esses parâmetros.

De acordo com a norma C618 (ASTM, 2019), para a utilização da cinza nos ensaios, ela deve possuir teor de umidade máxima de 3%, ao fazer o teste de umidade em estufa a 105 °C por 24 horas determinou-se 0,3 %, sendo então aceitável a sua umidade. Segundo Amaral e Holanda (2014), a alta umidade do resíduo pode prejudicar a hidratação do cimento, comprometendo as propriedades da mistura.

O ensaio de perda de massa na ignição indicou uma diminuição em massa de 31,1 %, porém de acordo com a C618 (ASTM, 2019), a porcentagem máxima de perda de massa por ignição deve ser de 10%. Devido a cinza ser proveniente do bagaço de cana e a queima desse bagaço ser descontrolada, algumas fibras podem não ter sido queimadas totalmente durante o processo, apresentando assim partículas de fibras não queimadas. Segundo Ernesto *et al* (2009), as fibras se decompõem em temperaturas de 150 a 320 °C, e o ensaio ocorreu em 700 °C, dessa maneira essas fibras foram degradadas durante a execução do ensaio, o que observou-se uma grande perda de massa, influenciando na massa total.

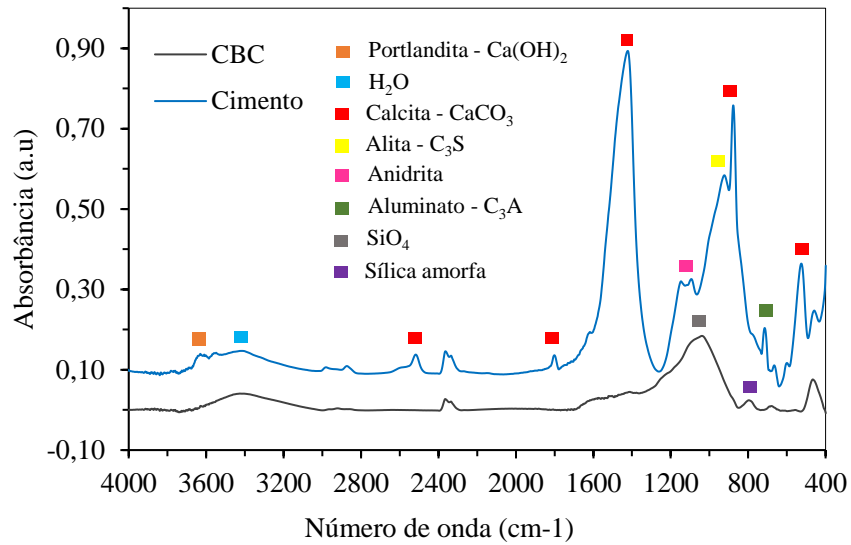
4.2 Análise FTIR da CBC, cimento e pastas de cimento

A Figura 6 apresenta o espectro de FTIR utilizando a técnica de transmissão com resolução de 4 cm^{-1} , constatando a presença de vários materiais cimentícios na espectroscopia de infravermelho de resíduos filtrados na amostra do cimento e da CBC.

No gráfico é possível identificar as fases e os principais picos no cimento: como silicatos tricálcico C_3S - Alita (910,27 cm^{-1}), aluminato de cálcio tricálcico - C_3A (711,63 cm^{-1}), $\text{Ca}(\text{OH})_2$ (3598,67 cm^{-1}), H_2O (3396,17 a 3448,24 cm^{-1}), Calcita - CaCO_3 (2503,26 cm^{-1} , 1810,91 cm^{-1} , 1425,20 cm^{-1} , 877,49 cm^{-1} e 522,64 cm^{-1}), Anidrita (1157,13 cm^{-1}) (MANSUR, 2007).

Também utilizou técnicas de infravermelho na amostra de CBC onde é possível constatar a presença de sílica amorfa na banda (831,00 cm^{-1}) devido a vibrações de alongamento simétrico das mesmas unidades e o SiO_4 (1065,00 cm^{-1}) é atribuído devido às vibrações de alongamento assimétrico (Tchakouté *et al.* (2017). Esses componentes aparecem quando todo o carbono é eliminado da CBC, em temperaturas de 400 a 500° C. Após este processo a cinza torna-se rica em sílica amorfa, influenciando positivamente a formação de composto de resistência do SiO_4 , tornando boa atividade pozolânica (SILVA *et al.*, 2017).

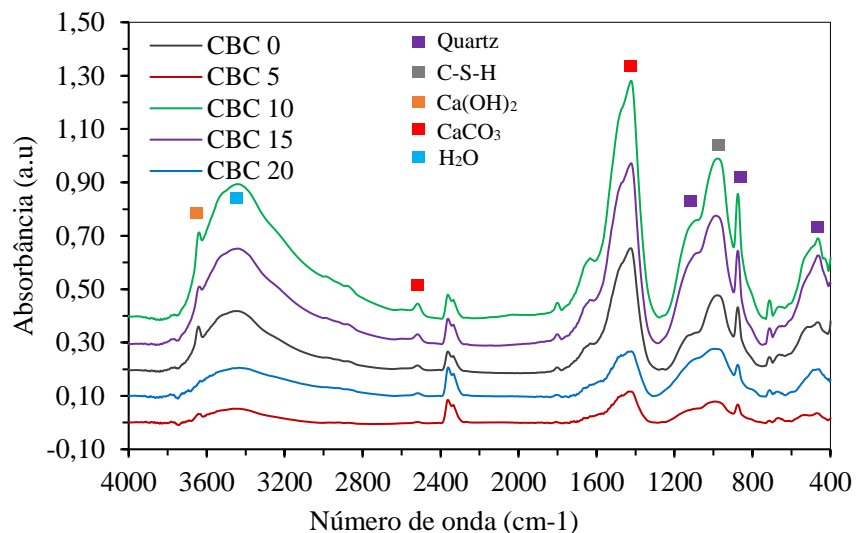
Figura 6 – Análise FTIR da CBC e do cimento.



Fonte: Próprio autor (2020).

A espectroscopia na região do infravermelho das pastas de cimento também foi realizada e as curvas para cada traço estudado são apresentadas na Figura 7. Após a interpretação das curvas foi possível observar as fases, e os compostos químicos presentes: de Ca(OH)_2 ($3606,39 \text{ cm}^{-1}$), o H_2O ($3457,89 \text{ cm}^{-1}$), CaCO_3 ($2505,18 \text{ cm}^{-1}$, $1415,55 \text{ cm}^{-1}$), Quartz ($1602,62 \text{ cm}^{-1}$, $873,63 \text{ cm}^{-1}$, $462,85 \text{ cm}^{-1}$), e o C-S-H (3600 cm^{-1}) (MANSUR, 2007). Já na amostra com a CBC, foi possível constatar a exibição de sílica amorfa na banda (831 cm^{-1}) e SiO_4 (1065 cm^{-1}) alguns dos principais constituintes dos cimentos (SOARES *et al.*, 2016).

Figura 7 – Análise FTIR das pastas de cimento.

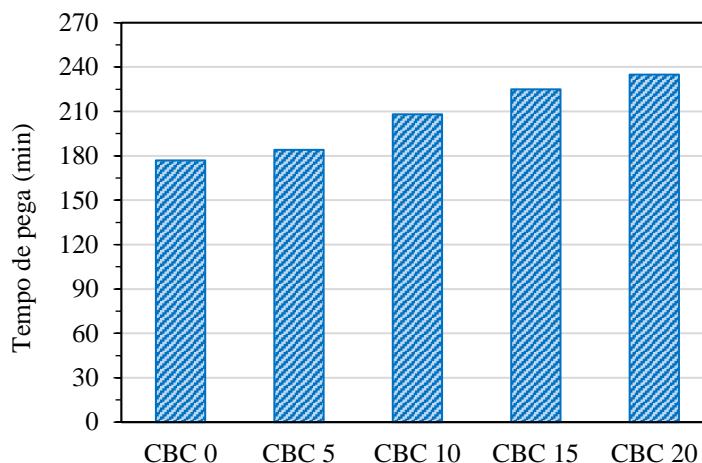


Fonte: Próprio autor (2020).

4.3 Tempo de pega das pastas de cimento.

Para analisar o endurecimento da argamassa realizou-se o método de determinação de início e fim de pega na pasta de cimento utilizando o aparelho de Vicat. A Figura 8 a seguir, apresenta o gráfico de tempo de pega, em minutos, para cada composição estudada.

Figura 8 - Tempo de pega das pastas de cimento.



Fonte: Próprio autor (2020).

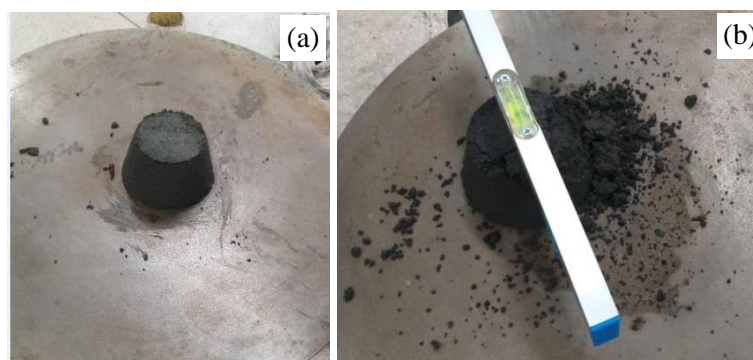
Pode-se observar no gráfico que cada traço teve comportamento diferente, à medida que a porcentagem da cinza cresceu, os minutos para o início de tempo de pega também aumentaram. Em estudos de substituição parcial do cimento por cinza realizados por Costa e Mascolo (2015) e Moura *et al.* (2018), foram observados para o ensaio de tempo de pega resultados com esse mesmo comportamento, onde, quanto maior o teor de cinza maior foi o tempo para início de pega.

De acordo com Mehta e Monteiro (2014), as partículas que possuem diâmetro maior que 45 μm têm hidratação lenta, e as que são superiores a 75 μm possuem ausência de hidratação completa. Aproximadamente 71% da cinza utilizada ficaram retidas na peneira de 75 μm , justificando a perda de plasticidade ao adicioná-la à mistura reduzindo o teor de cimento, pois a granulometria influencia diretamente no tempo de pega, tornando o endurecimento da pasta mais lento.

4.4 Propriedades físicas e mecânicas das argamassas

Para analisar a plasticidade das argamassas foi realizado o ensaio de Índice de consistência, na Figura 9 a seguir é possível observar a realização do ensaio.

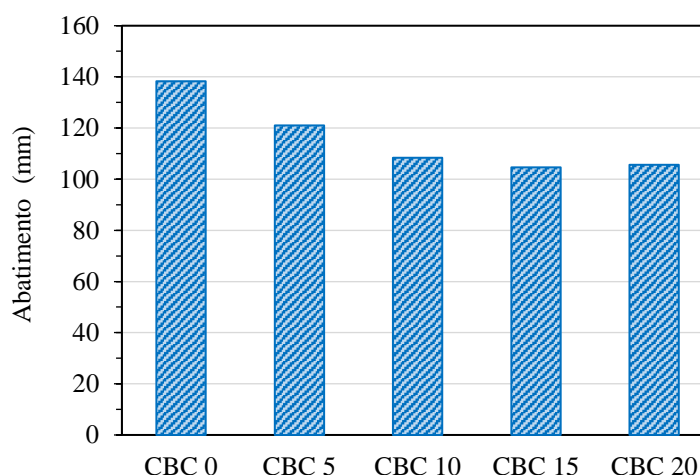
Figura 9 – Determinação do Índice de consistência. Traço CBC 5 (a). Traço CBC 20 (b).



Fonte: Próprio autor (2020).

Pode-se observar nas imagens acima, que a argamassa com maior teor de cinza ficou mais seca e menos maleável, desintegrando-se mais que os traços com menores teores. A seguir, a Figura 10 apresenta o gráfico com as médias dos diâmetros obtidos de cada traço no ensaio de Índice de Consistência.

Figura 10 – Índice de consistência das argamassas.



Fonte: Próprio autor (2020).

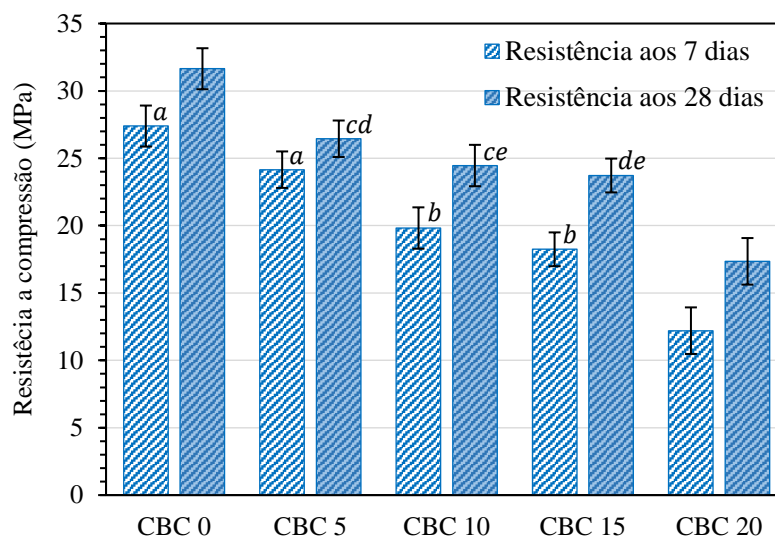
Pode-se observar nos gráficos que cada traço teve comportamento diferente, à medida que a porcentagem da cinza cresceu o diâmetro do topo no ensaio de abatimento diminuiu, devido ao espalhamento na base. O traço de referência obteve índice de consistência maior, que reduziu com a substituição do cimento pela cinza, indicando a perda de plasticidade.

Estes resultados foram semelhantes aos de Sampaio *et al.* (2014) e de Chusilp *et al.* (2009), onde também observaram a redução da trabalhabilidade com o aumento de teor da CBC. Segundo Sampaio *et al.* (2014), essa queda justifica-se pelo fato de a cinza ter granulometria muito fina, então ela absorve muita água para manter a consistência da argamassa, tornando-a mais seca e menos trabalhável.

Os corpos de prova foram rompidos aos 7 e 28 dias para análise da resistência mecânica à compressão. Todos os dados foram tabelados e estão representados na Figura 11 a seguir. Os resultados de 7 e 28 dias são semelhantes, notando que conforme aumentou o teor de cinza a

resistência à compressão reduziu, pois reduziu-se a contribuição do efeito microfíler proveniente do cimento. Quanto maior a relação água/cimento menor a resistência mecânica, o traço CBC 20 teve uma relação superior aos demais traços, sendo de 0,64, resultando em menores valores de resistência.

Figura 11 - Resistência a compressão dos corpos de prova aos 7 e 28 dias. (As letras *a b c d e*, indicam os grupos estatisticamente semelhantes de acordo com o teste de Tukey).



Fonte: Próprio autor (2020).

De acordo com Isaia (2007), as partículas de cinza inferiores a 10 μm , até os 28 dias influenciam no aumento da resistência mecânica, as que possuem diâmetro entre 10 μm e 45 μm ajudam a aumentar a resistência após os 28 dias de idade, e as partículas acima de 45 μm podem não influenciar no ganho de resistência. Dessa forma, é possível observar que ao ficar retida na peneira de 75 μm uma porcentagem de 71,6% de cinza tratada, constata-se que apenas uma minoria pode ser inferior a 45 μm . Assim uma elevada porcentagem da cinza utilizada não influencia na resistência, justificando a redução da resistência dos corpos de prova com o aumento do teor da CBC.

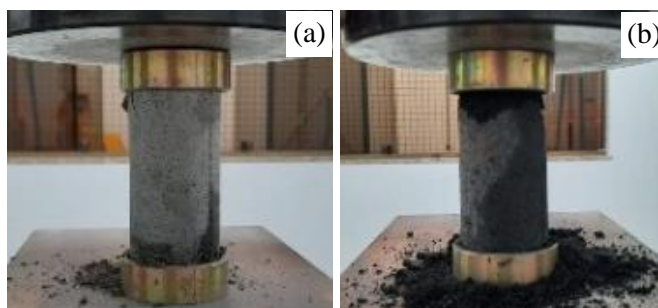
Sobre o Índice de atividade de força, a norma C618 (ASTM, 2019) diz que nos rompimentos dos corpos de prova aos 7 e 28 dias, os traços com a substituição parcial de cimento por cinza devem atingir no mínimo 75% de resistência em comparação ao traço de referência. A NBR 5752 (ABNT, 2014), também estabelece essa mesma porcentagem para um material ser considerado pozolânico. Os resultados de 7 e 28 dias, indicam que somente o traço CBC 5 atendeu as exigências mínimas, alcançando 90,62% e 83% respectivamente, já os demais traços foram inferiores ao mínimo exigido por norma. De acordo com Sampaio et al. (2014), a baixa atividade pozolânica das cinzas pode ser por não ter ocorrido uma completa combustão do bagaço da cana, gerando elevada quantidade de teor de carbono.

Na Figura 11 é possível observar os resultados dos ensaios de resistência mecânica a compressão de 7 e 28 dias, no qual os resultados obtidos foram submetidos à análise de variância (ANOVA), sendo comparadas pelo teste de Tukey com nível de significância de $p = 0,05$. Este teste contribui positivamente para um melhor entendimento dos resultados de cada

ensaio. Foram analisados os efeitos da interação entre os fatores de variação (SILVEIRA, 2010). No primeiro teste a substituição parcial do cimento Portland pela CBC aos 7 dias obteve dois resultados estatisticamente semelhante entre a amostra CBC 0 / CBC 5 e entre a CBC 10 / CBC 15. Na segunda verificação, aos 28 dias foi constatado através do teste de Tukey que as amostra CBC 5/CBC 10, CBC 5/CBC 15 e a CBC 10/CBC 15 são estatisticamente semelhantes de acordo com o grupo analisado.

Apesar de apenas o traço CBC 5 ter atendido às exigências mínimas conforme a NBR 5752 (ABNT, 2014), de acordo com o teste de Tukey, o traço CBC 10 foi estatisticamente semelhante à CBC 5, aos 28 dias, então a substituição de 10% estatisticamente pode atender às exigências. A Figura 12 apresenta dois diferentes corpos de prova após o rompimento no ensaio de resistência mecânica à compressão.

Figura 12 – Ensaio de compressão. Traço CBC 0 (a). Traço CBC 20 (b).



Fonte: Próprio autor (2020).

Notou-se que houve escurecimento na coloração dos corpos de prova à medida que houve acréscimo no teor da cinza. Além disso, ao pesar os corpos de prova após serem desmoldados, observou-se que conforme a substituição do cimento aumentou, a massa reduziu, isso acontece pelo fato de a cinza ser mais leve que o cimento.

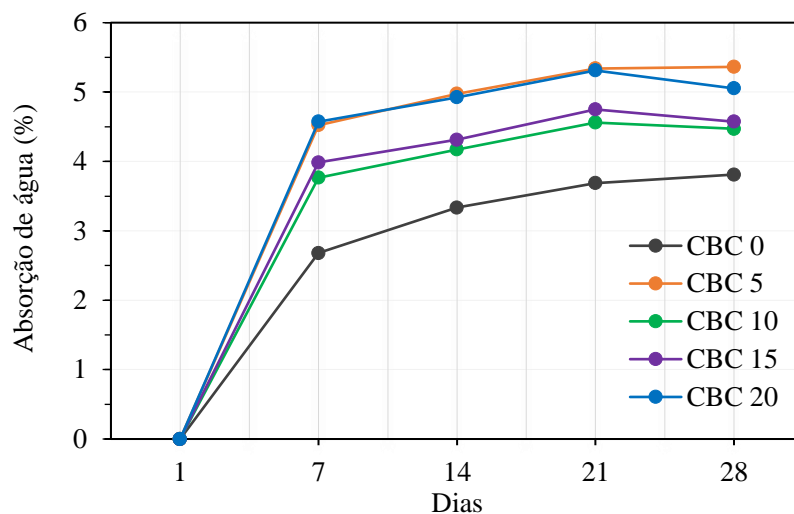
De acordo com Nunes *et al.* (2010) e Paula *et al.* (2009), ao estudarem o potencial da CBC para substituição parcial do cimento Portland, concluíram que é possível substituir utilizando teores de 13 a 20% respectivamente, sem ocorrer perdas de resistência a compressão, porém no presente trabalho isso não foi evidenciado.

Por não haver nenhuma norma que indica os tipos de ruptura de corpos de prova de argamassa, utilizou-se a NBR 5739 (ABNT, 2018), que determina as rupturas dos corpos de prova de concreto no ensaio de compressão. De acordo com a norma, o tipo de ruptura dos corpos de prova foram fraturas próximas, alguns foram no topo e em outros foram na base.

4.5 Absorção de água

Na Figura 13 é apresentado um gráfico de linhas com a porcentagem da absorção de água por imersão dos corpos de prova, os quais coletou-se a massa de 7 em 7 dias até seu rompimento aos 28 dias.

Figura 13 – Absorção de água dos corpos de prova.



Fonte: Próprio autor (2020).

De acordo com o gráfico, é possível notar que o traço que menos absorveu água foi o que não contém cinza, e os corpos de prova com teores de cinza absorveram mais, apresentando serem mais porosos. É possível ver que houve algum erro experimental, pois a absorção foi crescente conforme aumentou o teor de cinza, porém a linha que representa o traço CBC 5 está próxima ao traço CBC 20. A absorção elevada do teor de substituição de 20% da CBC está de acordo com a baixa resistência à compressão desse traço.

Nota-se que nos primeiros 7 dias a absorção é maior, pois a água preenche apenas os poros, após os 7 dias ocorre uma queda na absorção devido os poros estarem mais preenchidos. Percebe-se que as massas estão bem semelhantes nas últimas semanas, porém há uma redução na absorção em alguns traços dos 21 para os 28 dias, podendo estar relacionado ao maior tempo gasto para aferir a massa aos 28 dias em relação aos 21 dias, enquanto ficaram secando após retirá-los do tanque, resultando em maior perda de massa e havendo uma queda.

A norma C618 (ASTM, 2019) classifica os materiais cimentícios suplementares em três classes de acordo com a quantidade de água em porcentagem que o corpo-de-prova produzido absorveu. Quando a absorção é de no máximo 105%, os MCS são integrantes das Classes F e C, e fazem parte da Classe N quando alcançam no máximo 115%. Dessa forma, os materiais utilizados no ensaio pertencem às Classes F e C, pois de acordo com os dados expressos no gráfico na Figura 13, as médias de absorção de água dos corpos de prova produzidos estão entre 2 e 5 %.

Os resultados quanto a função crescente, que aumentou a absorção à medida que se elevou o teor de cinza, se assemelham ao dos estudos de Paula *et al.*, (2009), que diz que as argamassas que possuem maiores teores de cinza tende a serem mais porosas, justificando os elevados valores de absorção. De acordo com Barbosa *et al.* (1998), este fato pode ser resolvido ao controlar o fator água/cimento em cada uma das combinações, pois a permeabilidade e porosidade são influenciadas pela relação água/cimento.

O aumento de absorção de água também está relacionado às fibras naturais não queimadas presentes na cinza. Essas fibras possuem afinidade à água, por isso são consideradas um material hidrofílico (ALI, *et al.*, 2009). Dessa forma, para que o resíduo de bagaço de cana

não influencie na relação/cimento, ele deve ser seco de forma correta antes de sua incorporação (MOKHENA, *et al.*, 2018).

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

A utilização da CBC em compósitos cimentícios se apresenta como uma solução atrativa para redução de custos e os impactos causados pela produção do cimento. Através dos dados obtidos dos ensaios realizados, constatou-se que a amostra de cinza não atingiu todos os parâmetros necessários para ser considerada pozolânica. Visto que a granulometria da cinza influencia de forma direta na resistência e na reatividade pozolânica, notou-se necessário realizar moagem. A umidade apresentada é aceitável de acordo com a ASTM C618 (ASTM, 2019), no entanto, devido à perda de massa de ignição ultrapassar o máximo exigido, é essencial o processo de calcinação visando eliminar as partículas que não foram totalmente queimadas, e aumentar a atividade pozolânica.

Os ensaios de tempo de pega e de consistência das pastas de cimento indicaram a perda de plasticidade, justificada pela elevada porcentagem de partículas de cinza superiores a 75 µm, que possuem ausência de hidratação. Os valores de absorção, que foram maiores ao aumentar o teor de cinza, revelou que esta possui fibras hidrofílicas, que absorvem água, o que indica a extrema importância do processo de secagem. Nota-se a redução da resistência à compressão ao incorporar a CBC, o que levou a apenas os traços de 5 e 10 % de substituição que são estatisticamente semelhantes atenderem às exigências.

Por se tratar de um resíduo agrícola a CBC apresentou pouca reatividade, os ensaios indicaram a viabilidade de ser usado na incorporação de argamassas como material cimentício suplementar. Mesmo com resistência mecânica inferior ao traço CBC 0, a substituição de 5 e 10 % apresentaram os melhores resultados. A substituição do cimento pela CBC em pequenas quantidades pode promover uma redução de custos e impactos ambientais na construção civil, além de estabelecer um destino adequado a este subproduto.

REFERÊNCIAS

- ABRÃO, P. C. R. A.; JOHN, V. M. **O uso de pozolanas como materiais cimentícios suplementares: disponibilidade, reatividade, demanda de água e indicadores ambientais.** 2019. Dissertação (Mestrado em Ciências) – Faculdade De Engenharia Civil, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2019.
- ALI, K.; AMIN, N.; SHAH, M. T. Physicochemical study of bagasse and bagasse ash from the sugar industries of NWFP Pakistan and its recycling in cement manufacturing. **Journal of the Chemical Society of Pakistan**, v. 31(3), p. 375–378, 2009.
- AMARAL, M. C.; HOLANDA, J. N. F. **Avaliação da incorporação de resíduo de cinzas de bagaço de cana-de-açúcar em tijolo solo-cimento.** 2014. Dissertação (Mestrado em Engenharia e Ciência dos Materiais) – Faculdade de Engenharia Civil, Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro, Campos dos Goytacazes, 2014.
- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM C618/19:** Standard Specification for Coal Fly Ash and Raw or Calcined Natural Pozzolan for Use in Concrete. United States, 2019.
- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM D 4326/13:** Método de Teste Padrão para Elementos Principais e Menores em Carvão e Coqueria por Fluorescência de Raios-X. Pennsylvania, 2013.
- ARIF, E.; CLARK, M.W; LAKE, N. Sugar cane bagasse ash from a high efficiency co-generation boiler: Applications in cement and mortar production. **Construction and Building Materials**, v. 128, p. 287-297, 2016.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 5739:** Concreto - Ensaio de compressão de corpos de prova cilíndricos. Rio de Janeiro, 2018. 09 p.
- _____**NBR 5752:** Materiais pozolânicos - Determinação do índice de desempenho com cimento Portland aos 28 dias. Rio de Janeiro, 2014. 4 p.
- _____**NBR 7215:** Cimento Portland - Determinação da resistência à compressão de corpos de prova cilíndrico. Rio de Janeiro, 2019. 12 p.
- _____**NBR 9778:** Argamassa e concreto endurecidos - Determinação da absorção de água, índice de vazios e massa específica. Rio de Janeiro, 2005. 4 p.
- _____**NBR 16606:** Cimento Portland - Determinação da pasta de consistência normal. Rio de Janeiro, 2018. 8 p.
- _____**NBR 16697:** Cimento Portland - Requisitos. Rio de Janeiro, 2018. 12 p.
- _____**NBR NM 18:** Cimento Portland - Análise química - Determinação de perda ao fogo Rio de Janeiro, 2012. 4 p.
- _____**NBR NM 67:** Concreto - Determinação da consistência pelo abatimento do tronco de cone. Rio de Janeiro, 1998. 08 p.

_____**NBR NM 248**: Agregados - Determinação da composição granulométrica. Rio de Janeiro, 2003. 06 p.

BAHURUDEEN, A. et al. Influence of different processing methods on the pozzolanic performance of sugarcane bagasse ash. **Cement & Concrete Composites**. v. 56, p. 32-45, 2015.

BARBOSA, M. F., LIMA, E., PIRES SOBRINHO, C. W. A. **Estudo de argamassas com adições de cinza de casca de arroz e cinza de cana-de-açúcar**. In: Encontro Nacional de Tecnologia do Ambiente Construído Qualidade no Processo Construtivo, 7, 1998, Florianópolis.

CABRAL, S. C.; AZEVEDO, M. A. Materiais alternativos para adição ao cimento Portland. **Revista Científica Vozes dos Vales**, Minas Gerais, n.10, 2016.

CARMO, M. E. R.; SERRA, J. C. V.; LOPES, S. C. et al. Concreto com incorporação da cinza do bagaço da cana-de-açúcar: Uma revisão literária. **Revista de Engenharia e Tecnologia**, v. 11, n. 2, p. 160-169, 2019.

CASTRO, W. A. M; NEVES, G. A.; FERREIRA, H. C. **Incorporação de resíduos de caulim em argamassas para uso na construção civil**. 2008. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Materiais) – Faculdade de Engenharia, Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, 2008.

CHUSILP, N.; JATURAPITAKKUL, C.; KIATTIKOMOL, K. Utilization of bagasse ash in concrete. **Construction and Building Materials**, v. 23, p. 2258-3338, 2009.

CORDEIRO, G. C.; TOLEDO FILHO, R. D.; FAIRBAIRN, E. M. R. **Utilização de cinzas ultrafinas do bagaço de cana-de-açúcar e da casca de arroz como aditivos minerais em Concreto**. 2006. Tese (Doutorado em Ciências em Engenharia Civil) – Faculdade de Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2006.

CORDEIRO, G. C.; TOLEDO FILHO, R. D.; FAIRBAIRN, E. M. R. et al. Atividade pozolânica e efeito de preenchimento de cinzas de bagaço de cana-de-açúcar em argamassas de cimento e cal de Portland. **Cement & Concrete Composites**, v.30, p.410-418, 2008.

CORDEIRO, G. C.; TOLEDO FILHO, R. D.; FAIRBAIRN, E.M. R. Caracterização de cinza do bagaço de cana-de-açúcar para emprego como pozolana em materiais cimentícios. **Quím. Nova**, São Paulo, v. 32, p. 82-86, 2009.

COSTA, A. B; MASCOLO, R. **Potencial pozolânico da cinza volante como material de substituição parcial de cimento**. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Civil) – Universidade do Vale de Taquari, Lajeado, 2015.

DWIVEDI, V. N.; SINGH, N. P.; DASA, S. S. et al. A new pozzolanic material for cement industry: Bamboo leaf ash. **International Journal Of Physical Sciences**, v. 1, p. 106-111, 2006.

ERNESTO, V. A. R. T.; RIBEIRO, C. A.; FERTONANI, F. L. **Caracterização térmica do bagaço da cana-de-açúcar visando aproveitamento energético**. Dissertação (Mestrado em

Engenharia e Ciência dos Materiais) – Faculdade de Engenharia Civil, Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro, Campos dos Goytacazes, 2014.

FREITAS, E. S.; DÉ SIR, J. M.; DIAS, D. P. **Caracterização da cinza do bagaço da cana-de-açúcar do município de campos dos goytacazes para uso na construção civil**. 2005. Dissertação (Mestrado em Química) – Faculdade de Química, Universidade Estadual Paulista, Araraquara, 2009.

GANESAN, K.; RAJAGOPAL, K.; THANGAVEL, K. Evaluation of bagasse ash as supplementary cementitious material. **Cement & Concrete Composites**. p. 515–524, 2007.

ISAIA, G.C. **Concreto: Ciência e tecnologia**, v. 1. São Paulo: IBRACON, 2011.

ISAIA, G. C. **Materiais de construção civil e princípios de ciência e engenharia de materiais**, v. 2. São Paulo: IBRACON, 2007.

ISAIA, G. C.; HELENE, P. R. L. **Efeito de misturas binárias e ternárias de pozolanas em concreto de elevado desempenho: um estudo de durabilidade com vistas à corrosão da armadura**. 1995. Universidade de São Paulo, São Paulo, 1995.

JIMENÉZ-QUERO, V.G et al. Influence of sugar-cane bagasse ash and fly ash on the rheological behavior of cement pastes and mortars. **Construction and Building Materials**, v.40, p.691-701, 2012.

LOTHENBACH, B.; SCRIVENER, K.; HOOTON, R. D. Supplementary cementitious materials. **Cement and Concrete Research**, v. 41, n. 12, p. 1244–1256, 2011.

MANSUR, A. P. **Mecanismos físico-químicos de aderência na interface argamassa modificada com polímeros/cerâmica de revestimento**. Tese (Doutorado em Ciência e Engenharia de Materiais. Universidade de Minas Gerais, Belo Horizonte, p. 355, 2007.

MARTINS, M. M.; MEDEIROS, R. **Investigação da influência do uso de Materiais Cimentícios Suplementares em substituição parcial ao Cimento Portland**. 2018. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Civil) – Universidade do Sul de Santa Catarina, Tubarão, 2018.

MEHTA, P. K.; MONTEIRO P. J. M. **Concreto: microestrutura, propriedades e materiais**. São Paulo: IBRACON, 2014.

MOKHENA, T. C.; MOCHANE, M. J.; MOTAUNG, T. E.; LINGANISO, L. Z.; THEKISOE, O. M.; SONGCA, S. P. Sugarcane Bagasse and Cellulose Polymer Composites. **Sugarcane - Technology and Research**, 2018.

MOURA, A. A.; BAIL, A.; MOISÉS, M. **Argamassa com substituição parcial do cimento por resíduos industriais**. 2018. Dissertação (Mestrado em Engenharia Ambiental) – Faculdade de Engenharia Ambiental, Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Londrina, 2018.

NUNES, I. H. S.; VANDERLEI, R. D.; SECCHI, M.; ABE, M. A. P. Estudo das características físicas e químicas da cinza do bagaço de cana-de-açúcar para uso na construção. **Revista Tecnológica**, Maringá, v. 17, n. 1, p. 39-48, 6 jan. 2010.

PAULA, M. O.; TINÔCO, I. F. F.; RODRIGUES, C. S.; SILVA, E. N.; SOUZA, C. C. Potencial da cinza do bagaço da cana de açúcar como material de substituição parcial de cimento Portland. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 13, n. 3, p. 353-357, 2009.

RAHMAN, N.A.; WIDHIANA, I.; JULIASTUTI, R.; SETYAWAN, H. Síntese de sílica mesoporosa com estrutura de poros controlada a partir de cinzas de bagaço como fonte de sílica. **Colóides e Superfícies - Aspectos Físico-Químicos e de Engenharia** v. 476, p. 1-7, 2015.

RERKPIBOON, A. et al. Strength, chloride resistance, and expansion of concretes containing ground bagasse ash. **Construction and Building Materials**. v.101, p. 983-989, 2015.

RODRIGUES, M. S. et al. Cinza de palha de cana-de-açúcar como adição mineral em fibrocimento. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 17, p. 1347-1354, 2013.

SAMPAIO, Z. L. M.; SOUZA, P. A. B. F.; GOUVEIA, B. G. Análise da influência das cinzas do bagaço de cana-de-açúcar no comportamento mecânico de concretos. **Revista Ibracon de Estruturas e Materiais**, Natal, v. 7, p. 626-647, 2014.

SANTOS, L. A.; BAÊTA, F. D. **Uso de cinza de bagaço de cana-de-açúcar na produção de concretos especiais para aplicação em meios agressivos de instalações agroindustriais**. 2013. Tese (Doutorado em Ciências) – Faculdade de Engenharia Agrícola, Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2013.

SANTOS, T. A. et al. **Influência da temperatura de calcinação na pozolanicidade da cinza de bagaço de cana-de-açúcar (CBCA)**. In: Congresso Brasileiro de Engenharia e Ciência dos Materiais, 22., 2016, Natal.

SESSA, T. C. et al.; **Avaliação da utilização da cinza do bagaço de cana-de açúcar em concreto usando construções residenciais de menor impacto**. 2013. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Civil) - Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2013.

SILVA, R. G.; BORTOLETTO, M.; ALMEIDA, J. G. Sílica ativa e cinza do bagaço de cana-de-açúcar: Resíduos que podem suplementar ou substituir o cimento Portland. **ANAP Brasil**, v. 10, n. 21, 2017.

SILVEIRA, D. **A influência da substituição parcial do cimento portland pela cinza do bagaço de cana-de-açúcar (cbc) residual no concreto**. 2010 Dissertação de Mestrado - Engenharia Civil da Escola de Engenharia Civil da Universidade Federal de Goiás, 2010.

SOARES, M. M. N. et al. **Determinação da atividade pozolânica da cinza de bagaço de cana-de-açúcar comparada à sílica amorfa e cristalina**. 2015. Tese (Doutorado em Engenharia Metalúrgica, Materiais e de Minas) – Escola de Engenharia, Universidade Federal de Minas Gerais, Minas Gerais, 2015.

SOARES, M. M. N. et al. **Comparando o comportamento pozolânico da cinza do bagaço da cana-de-açúcar com o SiO₂ amorfo e cristalino**, compósitos de cimento e concreto. v. 71, p.20-25, 2016.

TCHAKOUTÉ, H. K. et al. Utilization of sodium waterglass from sugar cane bagasse ash as a new alternative hardener for producing metakaolin-based geopolymer cement. **Chemie der Erde - Interdisciplinary Journal for Chemical Topics of the Geosciences** v. 77, p.257-266, 2017.

TEIXEIRA, S.R.; SOUZA, A.E.; SANTOS, G.T.D.; PENA, A.F.V.; MIGUEL, A.G. Cinzas de bagaço de cana-de-açúcar como um potencial substituto de quartzo em cerâmica vermelha. **Journal of the American Ceramic Society**. v. 91, ed. 6, p.1883-1887, 2008.

TEODORO, P. E.; FERREIRA, M. H. Q.; CHARBEL, D. S. et al. Comportamento físico-mecânico do concreto com substituição de cimento Portland por cinzas de bagaço de cana-de-açúcar. **Revista eletrônica de Engenharia Civil**, v. 6, n. 2, p. 22-27, 2013.

VASCONCELOS, M. C. A.; CARNEIRO, A. M. P.; NETO, A. C. M. **Avaliação da atividade pozolânica da cinza do bagaço de cana-de-açúcar utilizando métodos físicos**. 2013. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Faculdade de Engenharia Civil, Centro de Tecnologia e Geociências da Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2013.

WEBER, S. L. et al. **Metodologia para obtenção de sílica de elevada reatividade para uso em concreto de alto desempenho a partir do processamento de cinza de casca de arroz**. 2001. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Faculdade de Engenharia Civil, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2001.