

INSTITUTO FEDERAL

Goiano

Campus Rio Verde

ENGENHARIA CIVIL

**ATIVIDADE POZOLÂNICA DAS CINZAS DE BAGAÇO
DE CANA DE AÇÚCAR SUBMETIDAS À DIFERENTES
TRATAMENTOS**

JULIA REZENDE MOTA

Rio Verde, GO.

2020

**INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA
GOIANO – CAMPUS RIO VERDE
ENGENHARIA CIVIL**

**ATIVIDADE POZOLÂNICA DAS CINZAS DE BAGAÇO DE CANA
DE AÇÚCAR SUBMETIDAS À DIFERENTES TRATAMENTOS**

JULIA REZENDE MOTA

Trabalho de Curso apresentado ao Instituto Federal Goiano – Campus Rio Verde, como requisito parcial para a obtenção do Grau de Bacharel em Engenharia Civil.

Orientadora: Prof. Me. Bruna Oliveira Campos

Co-orientadora: Dra. Eloiza da Silva Nunes

Rio Verde - GO

Fevereiro, 2020.

Sistema desenvolvido pelo ICMC/USP
Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)
Sistema Integrado de Bibliotecas - Instituto Federal Goiano

MM917a Mota, Julia Rezende
ATIVIDADE POZOLÂNICA DAS CINZAS DE BAGAÇO DE CANA
DE AÇÚCAR SUBMETIDAS À DIFERENTES TRATAMENTOS / Julia
Rezende Mota; orientadora Bruna Oliveira Campos; co-
orientadora Eloiza da Silva Nunes . -- Rio Verde,
2020.
40 p.

Monografia (em Engenharia Civil) -- Instituto
Federal Goiano, Campus Rio Verde, 2020.

1. residuo agroindustrial. 2. Chapelle. 3.
sustentabilidade. I. Oliveira Campos, Bruna ,
orient. II. da Silva Nunes , Eloiza , co-orient.
III. Título.

TERMO DE CIÊNCIA E DE AUTORIZAÇÃO PARA DISPONIBILIZAR PRODUÇÕES TÉCNICO-CIENTÍFICAS NO REPOSITÓRIO INSTITUCIONAL DO IF GOIANO

Com base no disposto na Lei Federal nº 9.610/98, AUTORIZO o Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia Goiano, a disponibilizar gratuitamente o documento no Repositório Institucional do IF Goiano (RIIF Goiano), sem ressarcimento de direitos autorais, conforme permissão assinada abaixo, em formato digital para fins de leitura, download e impressão, a título de divulgação da produção técnico-científica no IF Goiano.

Identificação da Produção Técnico-Científica

- | | |
|--|---|
| <input type="checkbox"/> Tese | <input type="checkbox"/> Artigo Científico |
| <input type="checkbox"/> Dissertação | <input type="checkbox"/> Capítulo de Livro |
| <input type="checkbox"/> Monografia – Especialização | <input type="checkbox"/> Livro |
| <input checked="" type="checkbox"/> TCC - Graduação | <input type="checkbox"/> Trabalho Apresentado em Evento |
| <input type="checkbox"/> Produto Técnico e Educacional - Tipo: _____ | |

Nome Completo do Autor: Julia Rezende Mota

Matrícula: 2015102200840185

Título do Trabalho: Atividade Pozolânica das Cinzas de bagaço de Cana de Açúcar submetidas à diferentes tratamentos

Restrições de Acesso ao Documento

Documento confidencial: Não Sim, justifique: _____

Informe a data que poderá ser disponibilizado no RIIIF Goiano: 17/02/2020

O documento está sujeito a registro de patente? Sim Não

O documento pode vir a ser publicado como livro? Sim Não

DECLARAÇÃO DE DISTRIBUIÇÃO NÃO-EXCLUSIVA

O/A referido/a autor/a declara que:

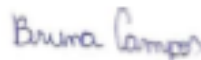
- o documento é seu trabalho original, detém os direitos autorais da produção técnico-científica e não infringe os direitos de qualquer outra pessoa ou entidade;
- obteve autorização de quaisquer materiais incluídos no documento do qual não detém os direitos de autor/a, para conceder ao Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia Goiano os direitos requeridos e que este material cujos direitos autorais são de terceiros, estão claramente identificados e reconhecidos no texto ou conteúdo do documento entregue;
- cumpriu quaisquer obrigações exigidas por contrato ou acordo, caso o documento entregue seja baseado em trabalho financiado ou apoiado por outra instituição que não o Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia Goiano.



Rio Verde, 10/02/2020.

Assinatura do Autor e/ou Detentor dos Direitos Autorais


Ciente e de acordo:



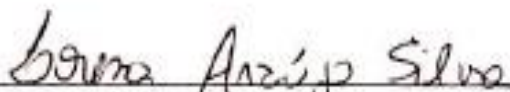
Assinatura do(a) orientador(a)

ATIVIDADE POZOLÂNICA DAS CINZAS DE BAGAÇO DA CANA DE AÇÚCAR SUBMETIDAS À DIFERENTES TRATAMENTOS

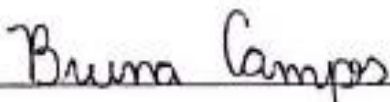
Trabalho de Curso DEFENDIDO e APROVADO em 10 de fevereiro de 2020, pela Banca Examinadora constituída pelos membros: Ma. Bruna Oliveira Campos, Dra. Eloiza da Silva Nunes Viali e Ma. Lorena Araújo Silva.



Profª. Dra Eloiza da Silva Nunes Viali



Profª. Ma. Lorena Araújo Silva



Profª. Ma. Bruna Oliveira Campos

Rio Verde – GO

Fevereiro, 2020

AGRADECIMENTOS

À Deus, primeiramente, por ter me concedido o dom da vida, por ter sido essencial na minha criação de valores e opiniões, e principalmente por ter me dado uma família e amigos tão incríveis que me possibilitaram estar vivenciando mais essa conquista.

Aos meus pais, Genivaldo e Ivoneide, que lutaram desde o início por mim e pelo irmão. Por terem incentivado tanto os nossos estudos e terem possibilitado essa oportunidade. Agradeço em especial, por meu pai ter plantado em meu coração a paixão pela engenharia civil e por minha mãe ter lutado comigo para tornar esse sonho real, mesmo tendo que assumir o papel de mãe e de pai.

À toda minha família, irmão, avós, primos, tios, por sempre torcerem e rezarem por mim, e por tantas vezes me escutarem e me aconselharem, sem vocês eu definitivamente não teria conseguido permanecer firme em meio a tudo que passamos.

Ao meu namorado, Gilmar Fernando, por ter sido meu maior apoio ao longo desse ciclo, por ter me aconselhado e me ajudado a enfrentar cada batalha. Você é o meu companheiro, estando comigo ao meu lado em todos os setores de minha vida, obrigado por ser o meu maior fã, crítico e colaborador desta conquista e a pessoa mais feliz por minhas realizações.

À minha professora orientadora, Me. Bruna Oliveira Campos, pela disponibilidade e disposição em me orientar, estando presente e fazendo muito mais que o seu papel como educadora. Desde a escolha do tema, sempre estive ao meu lado me aconselhando, me conduzindo para o melhor e me proporcionando confiança e calma. Agradeço por todo aprendizado, amizade e convivência. Estendo meus agradecimentos à banca examinadora, Prof.^a Eloiza Nunes, Eng.^a Lorena Araújo, Prof.^a Bruna Buiatte e Prof.^a Polyana Fernandes.

Aos meus amigos, que estiveram ao meu lado e me ajudaram durante toda a graduação. Em especial, ao Gilmar Fernando, a Juliana Nogueira, Weliton, Bárbara, Igor, Geovane, Rebeca e Jéssica Tinoco.

Aos professores, por todo conhecimento transmitido durante esses 5 anos, pelo afeto construído, e por toda contribuição na minha formação. E a todos que contribuíram direta ou indiretamente com essa conquista.

Ao Instituto Federal Goiano – Campus Rio Verde, pelo suporte durante esses 5 anos mediante auxílios estudantis, além das oportunidades oferecidas como monitorias e iniciação científica, que foram essenciais para complementar a minha formação.

RESUMO

MOTA, Júlia Rezende. **Atividade pozolânica das cinzas de bagaço de cana de açúcar submetidas à diferentes tratamentos**. 2020. 40 p. Monografia (Curso de Bacharelado de Engenharia Civil). Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia Goiano – Campus Rio Verde, Rio Verde, GO, 2020.

Os resíduos agroindustriais, gerados pelos processos industriais, em sua maioria, não são dispostos corretamente no ambiente ocasionando poluição do solo. Isto posto, o aproveitamento de resíduos agroindustriais mediante a substituição parcial do cimento por cinzas do bagaço da cana de açúcar (CBCA), em argamassas e concretos, é benéfica desde que esses resíduos sejam pozolânicos. Para tanto, este trabalho visou analisar a atividade pozolânica de CBCA, submetidas à diferentes tratamentos, a saber: cinza *in natura*, cinzas calcinadas à 400°C e à 600°C durante 3 horas, cinzas de requeima empírica e cinzas trituradas. Para a avaliação da pozolanicidade dos resíduos utilizou-se métodos de análise física e química sendo eles: determinação do desempenho com cimento Portland aos 28 dias e determinação do hidróxido de cálcio fixado - método Chapelle, respectivamente. A abordagem desses métodos visou identificar qual deles é mais eficiente, sob os aspectos viabilidade e confiabilidade dos resultados. Os resultados apresentaram-se distintos entre os métodos de análise da atividade pozolânica, sendo que as cinzas requeimadas empiricamente obtiveram maior índice de atividade pozolânica, 65,62%, no método do cimento aos 28 dias, enquanto a cinza *in natura* obteve melhor resultado no método Chapelle. Entretanto nenhum tratamento das CBCA atingiu a exigência mínima da NBR 5752 (ABNT, 2014) de 90% de atividade pozolânica e de 330 mgCaO/g, pois a dimensão das partículas e o teor de carbono nas CBCA interferem diretamente na pozolanicidade.

Palavras-chave: resíduo agroindustrial, Chapelle, sustentabilidade.

LISTA DE ABREVIACOES, SIGLAS OU SÍMBOLOS

NBR	Norma Brasileira Regulamentadora
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
NM	Norma MERCOSUL
CBCA	Cinza do Bagaço da Cana-de-augar
TGA	Análise termogravimétrica
CO ₂	Dióxido de carbono
Conab	Companhia Nacional de Abastecimento
MAPA	Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento
Snic	Sindicato Nacional da Indústria do cimento
CN	Cinzas <i>in natura</i>
C400	Cinzas calcinadas  400°C durante 3 horas
C600	Cinzas calcinadas  600°C durante 3 horas
CT	Cinzas trituradas
CR	Cinzas requeimadas

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Classificação dos materiais pozolânicos	12
Tabela 2 – Requisitos químicos	13
Tabela 3 – Requisitos físicos.....	13
Tabela 4 – Dosagem para moldagem de corpos de prova	22
Tabela 5 – Dosagem para moldagem de corpos-de-prova com os tratamentos	23
Tabela 6 – Índice de finura das CBCA sob diferentes tratamentos	29
Tabela 7 - Resistência a compressão da argamassa referência e com CBCA submetidas à diferentes tratamentos e o índice de atividade pozolânico (IAP)	29

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Fluoxagrama do procedimento experimental	15
Figura 2 – Amostras das cinzas submetidas aos tratamentos	16
Figura 3 – Amostra da cinza in <i>natura</i>	16
Figura 4 – Amostra da cinza submetida a requeima empírica	17
Figura 5 – Ensaio de análise termogravimétrica	18
Figura 6 – Amostra da cinza calcinada à 400°C durante 3 horas	19
Figura 7 – Amostra da cinza calcinada à 600°C durante 3 horas	19
Figura 8 – Amostra triturada	19
Figura 9 – Corpos de prova	24
Figura 10 - Perda ao fogo da CBCA	27
Figura 11 – Massa específica das argamassas	28
Figura 12 – Resistência média das argamassas.....	30
Figura 13 - Índice de atividade pozolânica- método Chapelle modificado.....	31

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	11
2 REVISÃO DE LITERATURA.....	13
2.1 Resíduos Agroindustriais em Materiais Cimentícios	13
2.1.1 Cinzas do bagaço de cana-de-açúcar.....	13
2.2 Aditivos Minerai.....	14
2.2.1 Materiais Pozolânicos.....	15
3 MATERIAL E MÉTODOS	18
3.1.1 CBCA in natura.....	19
3.1.2 CBCA requeima empírica.....	19
3.1.3 CBCA calcinada a 400 °C e 600°C por 3 horas	20
3.2 Perda ao fogo	22
3.3 Massa específica	23
3.5 Índice de desempenho com cimento Portland aos 28 dias	24
3.5.1 Materiais	24
3.5.2 Dosagem	25
3.5.3 Mistura e Moldagem	26
3.5.4 Cura	27
3.5.5 Resistência à compressão	28
3.6 Teor de hidróxido de cálcio fixado - Chappelle modificado	28
4 RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	30
4.1 Perda ao fogo	30
4.2 Massa Específica.....	31
4.3 Finura – Peneira 75 µm (nº200).....	31
4.6 Índice da Atividade Pozolânica – Método Chappelle Modificado	34
4.7 Comparativo dos Métodos - Cimento aos 28 dias e Chappelle Modificado	35
5 CONCLUSÃO	37
REFERÊNCIAS.....	39

1 INTRODUÇÃO

A cana-de-açúcar é utilizada nas indústrias como matéria-prima para a fabricação de açúcar e álcool combustível. Durante o processo, são realizadas três moagens até resultar no resíduo final denominado de bagaço da cana-de-açúcar. Esse resíduo é utilizado como combustível para alimentar caldeiras onde são queimados para a geração de vapor de alta pressão, que é direcionado às turbinas dos geradores para a produção de eletricidade. Após a queima, as cinzas que são o resíduo final do processo industrial, não possuem finalidade e não são reaproveitadas, devendo ser descartadas de forma ambientalmente consciente.

Segundo a Campanha Nacional de Abastecimento - CONAB (2019), o estado de Goiás é o segundo maior produtor de cana-de-açúcar, com cerca de 878,27 mil hectares de área plantada em 2019, dando origem a grandes quantidades de resíduos provenientes dessa cultura na produção do setor sucroalcooleiro. Ademais, segundo o Sindicato da Indústria de Fabricação de Etanol do Estado de Goiás, existem 37 destilarias sucroenergéticas no estado de Goiás e cerca de 14 destas estão próximas à Rio Verde. Isso gera um volume considerável de resíduos agroindustriais, o qual sua destinação torna-se um problema ambiental e econômico.

A incorporação das cinzas de bagaço de cana-de-açúcar, em substituição ou adição aos materiais cimentícios agrega valor a esse material de descarte e torna o processo produtivo mais sustentável. Sendo assim, a substituição parcial de cimento por cinzas de bagaço de cana-de-açúcar (CBCA) torna-se viável desde que apresentem pozolanicidade. A atividade pozolânica pode variar mediante os métodos de tratamentos que as CBCA são submetidas, e assim pode-se desenvolver um material com propriedades aprimoradas solucionando também uma questão ambiental.

Existem métodos para determinar a pozolanicidade dos materiais, sendo os principais o método de determinação do teor de hidróxido de cálcio fixado – método Chappelle (análise química) e o método de determinação do índice de desempenho com cimento Portland aos 28 dias (análise física). Para o material ser considerado pozolânico no método Chappelle modificado deve atingir 330 mg Ca (OH)₂/g, enquanto no método de cimento aos 28 dias, o índice deve ser superior ou igual a 90%.

Isto posto, o trabalho objetiva analisar a atividade pozolânica das CBCA submetidas a diferentes tratamentos mediante dois métodos de ensaios distintos. Ademais visa:

- Avaliar o melhor tratamento das cinzas do bagaço da cana-de-açúcar para a substituição parcial do cimento;
- Determinar qual método de ensaio Chapelle modificado ou atividade pozolânica aos 28 dias que obtém resultado mais confiável;
- Identificar as deficiências da execução dos ensaios de Chapelle modificado e da atividade pozolânica aos 28 dias.

Assim, o trabalho inova ao analisar duas metodologias de determinação da atividade pozolânica em diferentes tratamentos de resíduo agroindustrial, como a CBCA.

2 REVISÃO DE LITERATURA

Os resíduos agroindustriais vêm sendo amplamente estudados para utilização como combustíveis, fertilizantes e estabilizantes de solos. De acordo com documento Produção Brasileira de Cana-de-açúcar, Açúcar e Etanol, a produção da cana-de-açúcar na safra 2018/2019 girou em torno de 620,4 milhões de toneladas (MAPA, 2019). Sendo assim, a reciclagem dos resíduos agroindustriais apresenta-se como oportunidade benéfica para a preservação do meio ambiente e para a redução do custo, consumo de energia para a produção de materiais e componentes da construção (LIMA,2008).

2.1 Resíduos agroindustriais em materiais cimentícios

Os resíduos agroindustriais podem ser utilizados como adições minerais em materiais cimentícios. Tal fato é benéfico ao ambiente devido a quantidade de gases poluentes que são emitidos para a atmosfera na fabricação do cimento, principalmente do dióxido de carbono (CO₂). Barroso (2011) menciona que as utilizações de resíduos agroindustriais podem aumentar a durabilidade e resistência de argamassas e concreto, além de reduzir custos e impactos ambientais negativos decorrentes da fabricação do clínquer, principal constituinte do cimento e destinar corretamente esses resíduos.

Segundo Mehta e Monteiro (2014), a incorporação de materiais pozolânicos em argamassas e concretos trazem melhoria na trabalhabilidade, durabilidade à fissuração térmica e ao ataque químico e produção de concretos de alta resistência e desempenho.

Segundo Lima (2008), os resíduos agroindústrias mais utilizados em matrizes cimentícias são as cinzas de casca de arroz, da casca do coco da palma, da cama sobreposta de suínos, do bagaço da cana-de-açúcar, da serragem da madeira, da casca do eucalipto e da casca do castanha-do-pará.

2.1.1 Cinzas do bagaço de cana-de-açúcar

De acordo com o Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística o Brasil é o maior produtor de cana-de-açúcar, possuindo uma produção estimada de 667.532.475 toneladas para a safra de 2019 (IBGE, 2019). Porém, essa produção contribui com o aumento da quantidade de subprodutos e resíduos oriundos da agroindústria. Apesar do bagaço da

cana-de-açúcar ser utilizado para a geração de energia, o mesmo resulta em grande quantidade de resíduos nas usinas (SANTOS, 2017).

Os processos envolvidos na obtenção da cana-de-açúcar, como matéria prima, ocorrem da seguinte forma: após a colheita, a cana-de-açúcar é encaminhada para a usina e passa por três moendas, sendo que o produto da primeira moagem é destinado à produção de açúcar, enquanto o produto da segunda e da terceira moagem são utilizados para a produção de álcool combustível. Por fim, o bagaço, oriundo desse processo, é usado como combustível que produz vapor para a geração de eletricidade, constituindo-se de um processo de cogeração de energia. Durante a queima do bagaço da cana-de-açúcar são geradas cinzas residuais que alteram suas propriedades de acordo com as condições de queima e umidade (SALES *et al.*, 2010).

Segundo Cordeiro (2006), os estudos já desenvolvidos indicam que as CBCA possuem composição química vantajosa para o emprego como aditivo mineral, principalmente em relação aos teores de dióxido de silício e a perda ao fogo, que estão respectivamente, em torno de 60% e 6%. Contudo, esses estudos apontam que devido à distribuição granulométrica variável das cinzas, existe a necessidade de submetê-las ao processo de moagem para aumentar a superfície específica do material resultando em maior reatividade e homogeneidade do material, objetivando que 50% das partículas menores atinjam dimensões inferiores a 10 μ m.

É preciso levar em consideração que as condições de queima como temperatura, taxa de aquecimento, patamar e ambiente de queima interferem diretamente na atividade pozolânica das cinzas agroindustriais. Sendo assim, a cor das cinzas é uma indicação do grau de calcinação que o bagaço foi submetido, ou seja, do seu teor de dióxido de carbono pois quanto mais escura a cinza maior a quantidade de CO₂ elevando o percentual de sílica e reduzindo a reatividade do material (CORDEIRO, 2006).

2.2 Aditivos Minerais

Mehta e Monteiro (2014) definem aditivos minerais como materiais silicosos adicionados em quantidades variadas e dividem-se em materiais naturais e subprodutos. Os materiais naturais são aqueles processados por meio de britagem, moagem, separação por tamanho e ativação térmica com o intuito de produzir pozolana. Já os materiais subprodutos, são oriundos de processos industriais que podem passar ou não por tratamentos antes de serem utilizados como adição mineral.

As adições minerais são classificadas em hidráulica, pozolânica ou não reativa. As adições minerais hidráulicas são aquelas que formam produtos cimentantes apenas na presença da água, sendo potencializada com a adição de cal. As adições minerais pozolânicas são aquelas que possuem alto teor de sílica (SiO_2) e/ou alumina (Al_2O_3) porém quando usadas isoladamente não apresentam características cimentícias. No entanto, quando a adição é realizada em pequenas partículas, com elevada superfície específica e na presença de água, começam a reagir, à temperatura ambiente, com o hidróxido de cálcio presente no cimento formando silicatos e aluminatos de cálcio. Já as adições não reativas são aquelas que se relacionam exclusivamente ao efeito físico dos compósitos, ou seja, o empacotamento da mistura (PEREIRA, 2014).

Conforme Cordeiro (2006), os aditivos mais utilizados são as pozolanas, altamente reativas como a sílica ativa, argilas calcinadas, cinzas da casca de arroz e materiais de menor reatividade como cinzas volantes e escória de alto forno.

2.2.1 Materiais pozolânicos

A NBR 12653 (ABNT, 2014) define materiais pozolânicos aqueles que são silicosos ou silico-aluminosos e ao dividi-los e misturá-los a água, reagem com o hidróxido de cálcio, formando compostos com propriedades aglomerantes. As pozolanas podem ser naturais, sendo aquelas que submetidas a processamentos como britagem, moagem e separação por tamanhos, tornam-se mais reativas, e subprodutos oriundos de processos industriais. Mehta e Monteiro (2014) mencionam que os materiais pozolânicos podem ser utilizados como adição mineral ou suplementação em materiais cimentícios.

Os materiais pozolânicos também são classificados segundo a NBR 12653 (ABNT, 2014), que os divide em três classes, conforme a Tabela 1.

Tabela 1 – Composição química dos materiais pozolânicos.

Classificação	Definição
Classe N	Pozolanas naturais e artificiais que são materiais vulcânicos de caráter petrográfico ácido, “cherts” silicosos, terras diatomáceas e argilas calcinadas
Classe C	Cinzas volantes produzidas pela queima de carvão mineral em usinas termoelétricas
Classe E	Qualquer pozolana cujos requisitos diferem das classes anteriores.

Fonte: NBR 12653 (ABNT, 2014).

Os materiais devem atender às exigências físicas e químicas, para serem classificados e definidos como material pozolânico. Assim, existem exigências expressas na NBR 12653 (ABNT, 2014) para que o material ser enquadrado nessa categoria. A Tabela 2 mostra a composição química que os materiais devem apresentar para serem classificados como pozolânicos.

Tabela 2 – Composição química dos materiais pozolânicos.

Propriedades	Classe de material pozolânico		
	N	C	E
SiO ₂ + Al ₂ O ₃ + Fe ₂ O ₃	≥ 70%	≥ 70%	≥ 50%
SO ₃	≤ 4%	≤ 5%	≤ 5%
Teor de umidade	≤ 3%	≤ 3%	≤ 3%
Perda ao fogo	≤ 10%	≤ 6%	≤ 6%
Álcalis disponíveis em Na ₂ O	≤ 1,5%	≤ 1,5%	≤ 1,5%

Fonte: Adaptado da NBR 12653 (ABNT, 2014).

A Tabela 3 apresenta as propriedades físicas que os materiais pozolânicos devem ter para a sua classificação.

Tabela 3 – Propriedades físicas dos materiais pozolânicos.

Propriedades ^a	Classe de material pozolânico		
	N	C	E
Material retido na peneira com abertura de malha de 45µm	≤ 34%	≤ 34%	≤ 34%
Índice de atividade pozolânica:			
– com cimento aos 28 dias, em relação ao controle	≥ 90%	≥ 90%	≥ 90%
– com a cal aos 7 dias	≥ 6 MPa	≥ 6 MPa	≥ 6 MPa

^a Critérios de uniformidade: a massa específica e a finura de amostras individuais não podem ter variação, em relação à média estabelecida em dez ensaios consecutivos, superior a no máximo 5%, em todos os casos. Fonte: Adaptado da NBR 12653 (ABNT, 2014).

Conforme mostrado na Tabela 3, para que o material seja classificado como um material pozolânico, o índice de atividade pozolânica com cimento Portland aos 28 dias, deve ser maior que 90%.

A sílica (SiO₂) e/ou alumina (Al₂O₃) dos materiais pozolânicos reagem com o hidróxido de cálcio liberado no processo de hidratação do cimento, formando silicatos de cálcio hidratados (C-S-H), aluminatos de cálcio hidratados (AC-H) e/ou silicoaluminatos de cálcio hidratados (S-A-C-H) (MACEDO, 2009).

Segundo o Mehta e Monteiro (2014), essa reação entre a pozolana e o hidróxido de cálcio tem como consequência a interferência em três aspectos da reação pozolânica. Primeiro, ocorre o retardo da reação, assim ocorre também o retardado da taxa de liberação de calor e o desenvolvimento da resistência. Em segundo, a produção de hidróxido de cálcio é substituída pelo consumo do mesmo, gerando uma melhoria na durabilidade da pasta hidratada em ambientes agressivos. E por último, os produtos da reação são muito eficientes para preencher espaços capilares, tendo como consequência direta a melhoria da resistência e impermeabilidade do sistema.

3 MATERIAL E MÉTODOS

A presente pesquisa foi desenvolvida nas seguintes etapas: coleta e manutenção do material, a caracterização das CBCA, a produção da argamassa e a realização dos ensaios, conforme a Figura 1.

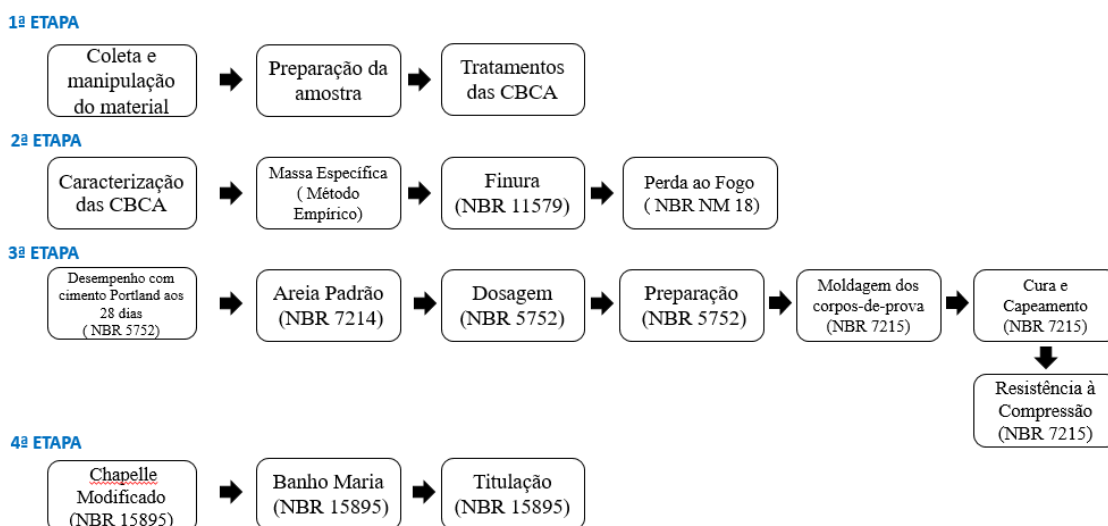


Figura 1 – Fluxograma do procedimento experimental.

Fonte: Autora (2020).

Para o desenvolvimento do trabalho, utilizou-se as cinzas de bagaço de cana de açúcar fornecidas pela Destilaria Nova União S/A, localizada na fazenda São Pedro, na Rodovia BR-060, no km 274, no município de Jandaia - GO. O material obtido foi seco em estufa à 105°C, durante 24 h no Laboratório de Construção do Instituto Federal Goiano - Campus Rio Verde.

3.1 Tratamentos das CBCA

As cinzas foram submetidas a cinco tratamentos distintos, a saber: in natura, requeima empírica, triturada, calcinadas à 400°C e 600°C por um período de 3 horas. Esses tratamentos são necessários para avaliar a atividade pozolânica e mensurar qual tratamento é mais eficaz. De acordo com o tratamento em que a CBCA foi submetida, nomeou-as em: cinza in natura (CN), cinzas calcinadas à 400°C durante 3 horas (C600),

cinzas calcinadas à 600°C durante 3 horas (C400), cinzas requeima empírica (CR) e cinzas trituradas (CT) ilustrado na Figura 2.

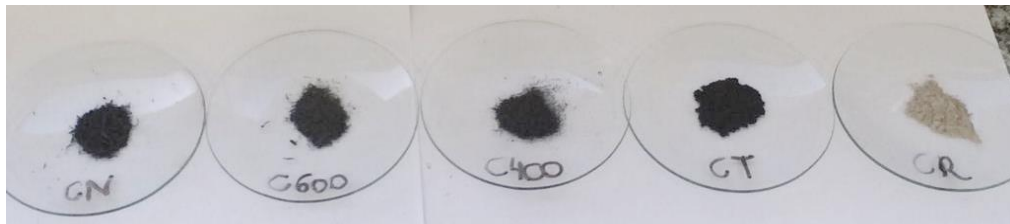


Figura 2– Amostra das cinzas submetidas aos tratamentos.
Fonte: Autora (2020).

Na Figura 2, apresenta-se as cinzas submetidas aos tratamentos, é notório a alteração de coloração, granulometria, finura, volume e densidade de uma amostra para a outra.

3.1.1 CBCA *in natura*

A cinza *in natura* subsidiou a avaliação comparativa entre os diferentes tratamentos, sendo, portanto, o valor referência. Para o preparo, secou a cinza *in natura* em estufa a 105°C durante 24 horas no Laboratório de Construção do Instituto Federal Goiano - Campus Rio Verde conforme a Figura 3.

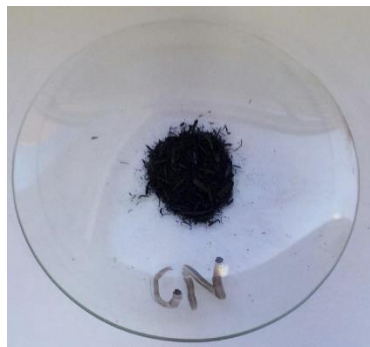


Figura 3 – Amostra de cinzas *in natura*.
Fonte: Autora (2020).

3.1.2 CBCA requeima empírica

A requeima empírica das CBCA foi realizada em fornalha de tijolos, com chapa metálica que continha as cinzas. Para melhor efetividade da combustão, umidificou as

cinzas com óleo animal. A cinza requeimada era retirada da fornalha sob aspecto visual, ou seja, quando apresentava cor clara, como mostra a Figura 4.



Figura 4 – Amostra de CBCA submetida a requeima empírica.
Fonte: Autora (2020).

Observa-se que na Figura 4, o tratamento da requeima empírica alterou a tonalidade das cinzas, obtendo uma coloração acinzentada semelhante ao do cimento Portland, levando em consideração que em análise visual atingiu uma coloração próxima do cimento.

3.1.3 CBCA calcinada a 400 °C e 600°C por 3 horas

O processo de calcinação é necessário para reduzir o percentual de carbono da amostra e aumentar o percentual de sílica, tornando-a mais reativa. Neste estudo, a queima foi realizada em um forno tipo mufla, a duas temperaturas de 400°C e 600°C durante 3 horas, com uma taxa de aquecimento de 10°C/min e com resfriamento no próprio forno (sem controle) no Laboratório de Saneamento Ambiental do Instituto Federal Goiano - Campus Rio Verde. As temperaturas selecionadas, 400 e 600°C, foram baseadas em análise termogravimétrica (TGA) que mensura a perda de massa com o aumento da temperatura ilustradas na Figuras 5. Essa análise térmica foi realizada no Centro Regional para o Desenvolvimento Tecnológico e Inovação (Crti), localizado em Goiânia – GO, utilizando o equipamento Shimadzu DTG-60H. As medidas foram realizadas no intervalo de temperatura de 25 a 900 °C, com taxa de aquecimento de 10°C/min, fluxo de ar sintético de 100 mL/min em cadinhos de platina de 70 µL. O resultado da análise é apresentado no gráfico da Figura 5 em que a porcentagem de perda de massa é representada no eixo y e em função da temperatura do forno no eixo x.

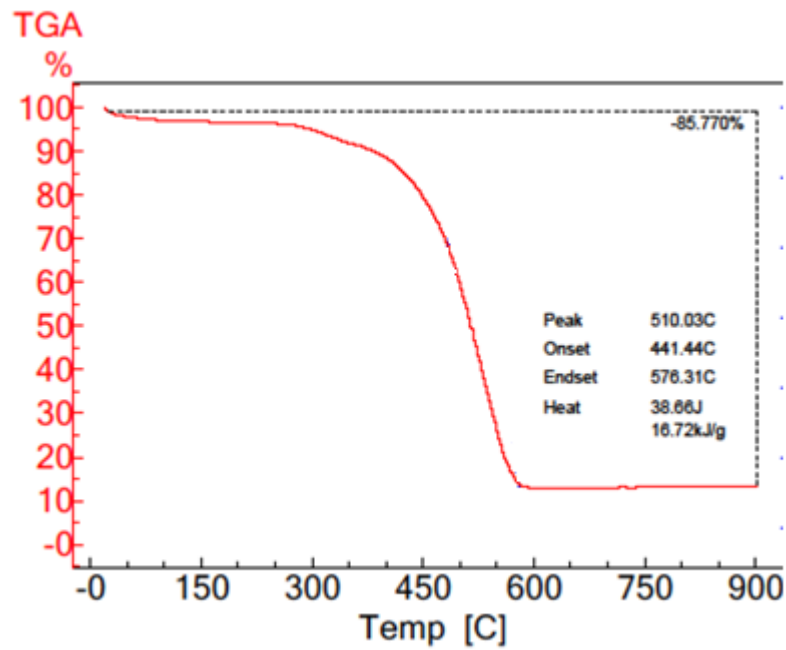


Figura 5 – Amostra de CBCA submetida a requieima empírica.

Fonte: CTRI (2018).

Com a Figura 5, nota-se que em torno de 400°C observa-se maior perda de massa da amostra e a partir da temperatura de 600°C a massa torna-se constante. Conclui-se então que as calcinações das CBCA devem ser realizadas nesse intervalo de temperatura para evitar a formação de outras fases cristalinas pois os materiais amorfos são mais reativos (BARROSO, 2011).



Figura 6 – Amostra de CBCA calcinada à 400°C durante 3 horas.

Fonte: Autora (2020).

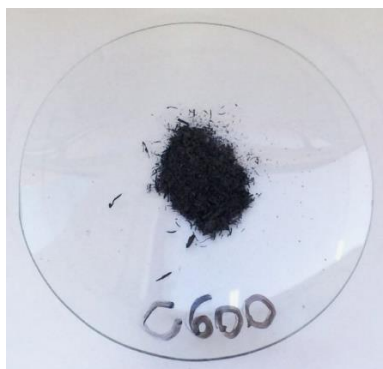


Figura 7– Amostra de CBCA calcinada à 600°C durante 3 horas.
Fonte: Autora (2020).

3.1.4 CBCA trituradas

As amostras de CBCA, secas em estufa, à 105°C por 24 horas, foram trituradas em liquidificador doméstico, sendo realizado o processo em etapas. Em cada uma delas, inseriu 50 g da amostra e triturou-as durante 1 minutos como é demonstrado na Figura 8.

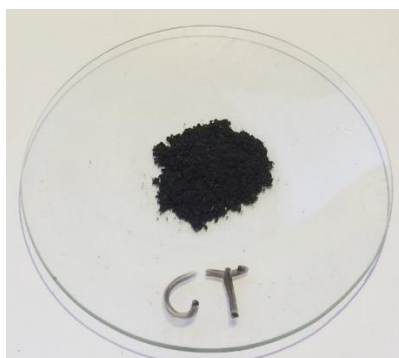


Figura 8 – Amostra triturada de CBCA.
Fonte: Autora (2020).

3.2 Perda ao fogo

Não existe um método consagrado pela literatura e normalizado para determinar a perda ao fogo de resíduos agroindustriais, portanto o ensaio será adaptado da norma NBR NM 18 (ABNT, 2004) que estabelece dois procedimentos para determinar a perda ao fogo em cimentos. O método 1 consiste em uma referência e deve ser aplicado a todos os tipos de cimento com exceção daqueles que contenham adições de escória granulada de alto-forno, enquanto o método 2 destina-se ao ensaio de cimentos que contenham adições de escória granulada de alto-forno.

Para a realização do ensaio de perda ao fogo, utilizou-se 1,0 g de CBCA, colocados em cadinho de porcelana de massa conhecida e calcinou a amostra em forno

mufla à temperatura entre 900 °C e 1000°C, durante 50 min. Após esse tempo, esperou esfriar a amostra, na própria mufla e pesou-se novamente.

A perda ao fogo refere-se, em grande parte, ao dióxido de carbono que determina a coloração preta do material. O percentual de perda ao fogo é determinado pela Equação 1:

$$PF = \frac{(Mq - Ms)}{Ms} * 100 (\%) \quad (1)$$

Onde:

Ms: massa da CBCA seca a 80°C (g)

Mq: massa da CBCA submetida à temperatura de 950°C por 50 min (g)

PF: perda ao fogo (%)

3.3 Massa específica

Para a determinação da massa específica, utilizou o método empírico que consiste na utilização de uma proveta graduada com tampa e um líquido com densidade inferior a densidade na amostra, nesse caso, o álcool etílico. Inicialmente, adicionou 5 ml de álcool etílico no frasco e registrou o volume (V1). Em seguida, acrescentou-se 0,5 gramas da amostra dentro no frasco, e registrou novamente o volume (V2). Através, do deslocamento do líquido, foi possível mensurar a densidade do material. A massa específica é obtida através da Equação 2:

$$\rho = \frac{M}{V_2 - V_1} \quad (2)$$

Onde:

M: massa do material pozolânico, em g;

V₁: volume inicial do líquido, em mL;

V₂: volume final do líquido, em mL;

3.4 Determinação da finura por meio da peneira 75 µm (nº 200)

Para a determinação da finura das cinzas adaptou-se a NBR NM 11579 (ABNT, 1991) que obtém esse valor através de procedimentos manuais e mecânicos. A conclusão

da finura do material, é calculada por meio da porcentagem, em massa, de cimento que fica retido na peneira com grãos com dimensões superiores a 75 µm.

Inicialmente pesou-se 50 gramas de amostra de CBCA e colocou na peneira 75 µm (nº200) juntando ao fundo e a tampa, formando o conjunto que será utilizado ao longo do ensaio. Peneirou-se em movimentos suaves horizontais durante 5 minutos o conjunto e após esse período, com o auxílio de um pincel, limpou-se a peneira para desprender o material retido. Montou-se novamente o conjunto, e peneirou novamente com movimentos suaves e horizontais por mais 20 minutos sem parar. Ao fim desta etapa, repetiu-se o processo de limpeza e com o conjunto montado, peneirou-se por mais um minuto em movimento suave inclinado virando o conjunto em 60° a cada 10 segundos e repetiu esta etapa até a porcentagem de amostra no fundo do conjunto ser inferior à 0,05 g. Quando atingiu esse objetivo, pesou-se o material e obteve-se o valor para o cálculo do índice de finura, dado pela Equação 3:

$$F = \frac{R * C}{M} * 100 (\%) \quad (3)$$

Onde:

F: índice de finura, (%);

R: resíduo da amostra na peneira, 75 µm, (g);

M: massa inicial da amostra, (g);

C: fator de correção da peneira compreendido no intervalo de 1,00 ± 0,20.

3.5 Índice de desempenho com cimento Portland aos 28 dias

A NBR NM 5752 (ABNT, 2014) determina o índice de desempenho de materiais pozolânicos com cimento Portland aos 28 dias. O ensaio verifica a atividade pozolânica por meio da determinação da resistência à compressão da argamassa com substituição de 25% do cimento pelo material analisado e da argamassa referência.

3.5.1 Materiais

Cimento: o cimento utilizado foi o CP II-F-32, conforme a NBR 11578 (ABNT,1991) e em relação a resistência à compressão aos sete dias deve atingir um valor aproximadamente de (33 ± 3) MPa.

Areia normal: produziu-se a areia normal conforme a NBR 7214 (ABNT, 2015), sendo assim, obteve a mistura completa através do peneiramento seguindo as

condicionantes da mesma. Portanto, obteve-se 4 frações de areia com granulométricas diferentes, sendo elas, a granulometria grossa (2,4 mm - 1,2 mm), média grossa (1,2 mm – 0,6 mm), média fina (0,6 mm -0,3 mm) e fina (0,3mm -0,15 mm).

3.5.2 Dosagem

Para a realização desse ensaio é necessário preparar duas dosagens diferentes de argamassa, a saber: a argamassa A que contém cimento CP II-F-32, areia normal e água, e a argamassa B com substituição de 25 % em massa do cimento pelo material analisado, areia normal e água. Foram moldados 3 corpos de prova cilíndricos com dimensões de 50 x 10 mm, para cada dosagem. A Tabela 4 especifica a dosagem para as argamassas.

Tabela 4 – Dosagem para moldagem dos corpos de prova corpos-de-prova.

Material	Massa (g)	
	Argamassa A	Argamassa B ^a
Cimento CP II-F-32	624 ± 0,4	468 ± 0,4
Material analisado	-	156 ± 0,2
Areia normal ^b	1872,0	1872,0
Água	300 ± 0,2	300 ± 0,2

^a O material pozzolânico e o cimento CP II-F-32 devem ser previamente misturados e homogeneizados em recipiente fechado, durante 2 min, aproximadamente; ^b Quatro frações de (468,0 ± 0,3) g.

Fonte: NBR 5752 (ABNT, 2014).

Para o desenvolvimento deste ensaio foi calculado a dosagem da argamassa respeitando a NBR NM 5752 (ABNT, 2014) e adaptando aos diferentes tratamentos das CBCA. Sendo assim, a Tabela 5 apresenta a dosagem das argamassas deste trabalho.

Tabela 5 – Dosagem para moldagem dos corpos-de-prova com os tratamentos.

Traço ^a	Cimento (g)	Cinzas (g)	Areia (g)				Água (g)
			2,4-1,2 mm	1,2-0,6 mm	0,6-0,3 mm	0,3-0,15 mm	
CB	312	-	234	234	234	234	150
CN	234	78	234	234	234	234	150
C400	234	78	234	234	234	234	150
C600	234	78	234	234	234	234	150
CR	234	78	234	234	234	234	150
CT	234	78	234	234	234	234	150
Total	1248	312	1170	1170	1170	1170	750

^a As siglas significam CB (Traço Branco), CN (Traço com Cinza in natura), C400 e C 600 (Traço com cinzas calcinadas a 400° e 600°C, CR (Traço com cinzas requemadas) e CT (Traço com cinzas trituras).

Fonte: Autora (2020).

3.5.3 Mistura e Moldagem

A mistura e a moldagem dos corpos de prova foram realizadas conforme a NBR 7215 (ABNT, 1996), seguindo os procedimentos descritos na mesma como proporção, ordem e dosagens.

Mistura: para a obtenção da argamassa, acrescentou no misturador a água, o cimento e as cinzas, exceto para a argamassa de referência, e misturou-os por 30 segundos na velocidade baixa. Em seguida, sem paralisar o misturador, acrescentou-se a areia durante 30 segundos, e logo depois, alterou o misturador para velocidade alta por mais 30 segundos. Após esse tempo desligou-se o misturador durante 90 segundos, e nos 15 primeiros segundos, foi retirada a mistura aderida às paredes do misturador. Por fim, ligou-se novamente o misturador em velocidade alta por mais 60 segundos.

Moldagem: Os corpos de prova foram adensados em 4 camadas com 30 golpes com haste metálica, em cada uma delas. Para cada um dos 5 tratamentos, foram moldados 3 corpos de prova cilíndricos com dimensão de 50 x 100 mm. A Figura 7 mostra os corpos de prova para cada tratamento.



a)



b)

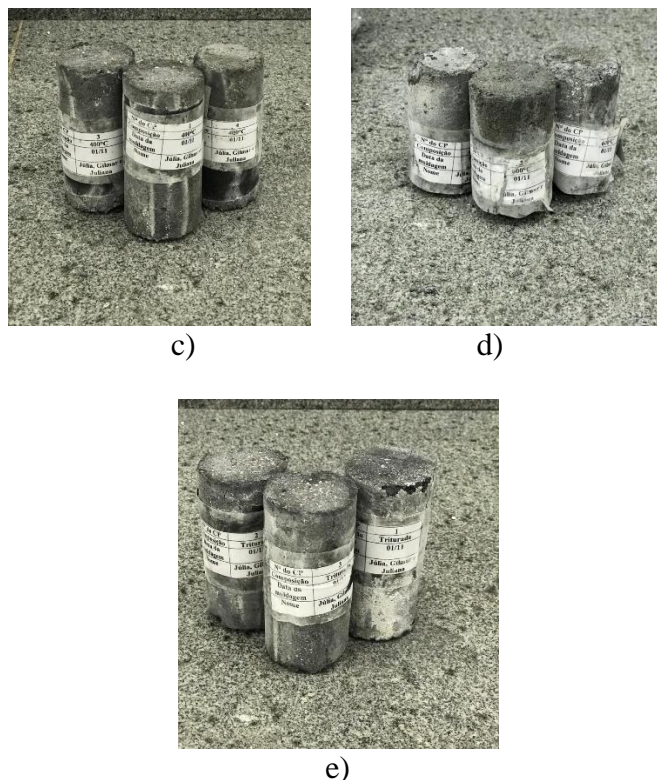


Figura 9 – Corpos de prova submetidos aos tratamentos de: a) argamassa referência; b) argamassa com o tratamento CR; c) argamassa com o tratamento C400; d) argamassa com o tratamento C600 e e) argamassa com o tratamento CT.
 Fonte: Autora (2020).

Através da Figura 9 observa-se que os métodos da C600, C400 e CT apresentam coloração escura e em contrapartida, o CR apresenta coloração semelhante ao da argamassa referência. Vale ressaltar, que o corpo de prova com 25% das cinzas *in natura* não permitiu a moldagem pois não atingiu a trabalhabilidade necessária.

3.5.4 Cura

O processo de cura foi dividido em duas etapas, conforme a NBR 7215 (ABNT, 1996). Primeiro, realizou-se a cura ao ar por um período de 24 horas, depois desenformou os corpos de prova e os submeteu a cura úmida por 28 dias até a realização do ensaio de resistência à compressão.

As superfícies do topo dos corpos de prova foram regularizadas mediante a retífica para melhorar a área de contato com a prensa de compressão, conforme especificado pela NBR 5738 (ABNT, 2015).

3.5.5 Resistência à compressão

O ensaio constitui no rompimento dos corpos-de-prova após serem regularizadas as superfícies por meio da retífica. O procedimento ocorre em uma prensa hidráulica de compressão, que vai aplicando progressivamente força até o corpo de prova ceder.

O índice de atividade pozolânica é determinado pela razão entre a resistência média à compressão, aos 28 dias, dos corpos de prova com substituição de cada material analisado e a resistência média à compressão de uma argamassa de referência, conforme apresentado na Equação 4.

$$IAP = \frac{f_{cp}}{f_c} * 100 (\%) \quad (4)$$

Onde:

IAP: índice de atividade pozolânica com cimento Portland;

f_c : resistência média à compressão, aos 28 dias, dos corpos de prova da argamassa de referência (MPa);

f_{cp} : resistência média à compressão, aos 28 dias, dos corpos de prova com substituição de 25% da massa de cimento pelo material analisado (MPa).

3.6 Teor de hidróxido de cálcio fixado - Chapelle modificado

A NBR NM 15895 (ABNT, 2010) estabelece o índice da atividade pozolânica de materiais por meio da determinação da fixação do hidróxido de cálcio, conhecido como método Chapelle modificado. A norma aplica-se a materiais silicosos e silíco-aluminosos cuja fase amorfa tenha capacidade de fixar o hidróxido de cálcio, como material pozolânico. O ensaio divide-se em cinco etapas a saber:

Primeira etapa: preparação da água deionizada. Inicialmente ferveu a água deionizada durante 30 minutos, em um béquer com capacidade de 2 L. Após a fervura, transferiu a água para o Erlenmeyer com capacidade de 2 L, tampou-o e deixe esfriar em temperatura ambiente. Após o resfriamento transferiu-se a água para um béquer de 1000 ml.

Segunda etapa: pesou-se 1,0 g da amostra do material pozolânico e 2,0 g de CaO. Posteriormente, transferiu-se os materiais para o balão de fundo redondo de 500 ml com tampa rosqueada e adicionou-se 250 ml de água deionizada, medida em balão volumétrico.

Após isso, colocou-o no agitador magnético, ligando a agitação. O banho-maria foi pré-aquecido à temperatura de 90°C e manteve-se a agitação e a temperatura por 16 horas.

Terceira etapa: preparou as soluções de fenolftaleína 1g/L, dissolveu e diluiu 0,1 g de fenolftaleína em álcool etílico absoluto até completar 100 ml e homogeneizou. Para a solução de sacarose, dissolveu 60g de sacarose seca em um balão volumétrico de 250 ml, utilizando água isenta de CO₂, completou o volume e homogeneizou e solução padronizada de ácido clorídrico (HCl) 0,1 M, diluiu aproximadamente 8,4 ml de HCl concentrado em água até completar 1000 mL de solução em balão volumétrico e homogeneizou.

Quarta etapa: padronização da solução de HCl 0,1 M com 0,500 ± 0,010 g de hidróxido de sódio, dissolvido em 100 ml de água. A titulação foi realizada em triplicata com o intuito de obter o fator de correção e foi processada com a solução de HCl, usando solução de fenolftaleína (1 g/L) como indicador. O ponto de equivalência foi atingido quando a coloração rosa se tornou persistente e obteve-se o volume de HCl consumido.

Quinta etapa: adicionou ao frasco balão de fundo redondo de 500 ml, solução de sacarose (240 g/L) recém preparada, e depois fechou hermeticamente e agitou a mistura durante 15 minutos. Por último, filtrou aproximadamente 100 ml da solução, usando papel de filtração média pregueado.

Sexta etapa: Pipetou 50 ml da solução e titulou com a solução de HCl 0,1 M, usando solução de fenolftaleína (1 g/L) como indicador. Obteve-se nessa etapa o volume de HCl consumido na titulação (V₂).

A determinação da atividade pozolânica, pelo método Chapelle, é dada pela Equação 5:

$$I_{Ca(OH)_2} = \frac{28 \cdot (V_3 - V_2) \cdot F_c}{M_2} * 1,32 \quad (5)$$

Onde:

$I_{Ca(OH)_2}$: índice de atividade pozolânica Chapelle, em mg/g;

M_2 : massa do material pozolânico, em g;

V_2 : volume de HCL 0,1 M consumido no ensaio com amostra, em mL;

V_3 : volume de HCL 0,1 M consumido no ensaio em branco, em mL;

F_c : fator de correção do HCL para uma concentração 0,1 M;

1,32: relação molecular $Ca(OH)_2/CaO$

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 Perda ao fogo

Devido a inexistência de norma específica para análise de perda ao fogo das CBCA, adotou-se o método exposto pela NBR NM 18 (ABNT, 2012) utilizada na determinação da perda ao fogo de cimento Portland. A Figura 10 apresentam os resultados obtidos.

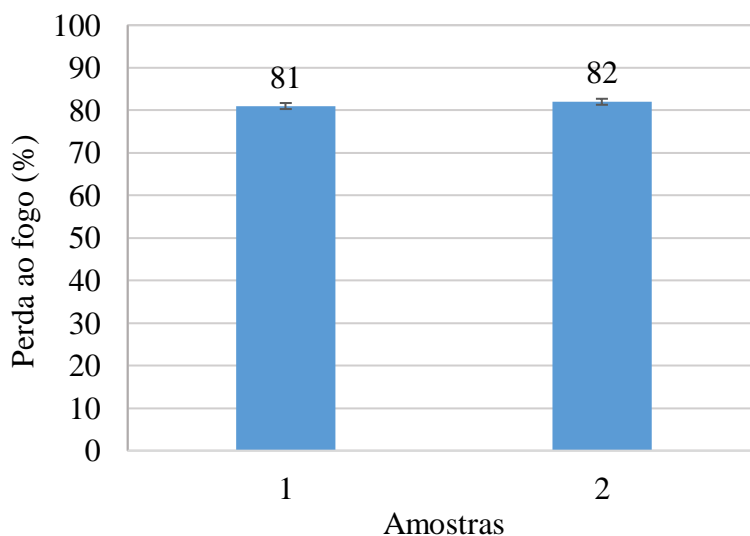


Figura 10 – Perda ao fogo da CBCA.
Fonte: Autora (2020).

Observa-se na Figura 10 que o ensaio foi realizado em duplicata com as CBCA que receberam o tratamento das cinzas *in natura* e as amostras 1 e 2 obtiveram 81% e 82% de perda ao fogo, respectivamente. Esse alto índice deve-se ao fato que a perda ao fogo está condicionada à presença de matéria orgânica na forma de carbono. Vale ressaltar que foi realizado o ensaio de perda ao fogo para as cinzas *in natura* que não receberam nenhum tratamento, portanto não ocorreu interferência dos tratamentos na amostra. Barroso (2011) realizou o ensaio de perda ao fogo nas cinzas de CBCA e atingiu um resultado semelhante, cerca de 82,24%.

Segundo Cordeiro (2006), o teor de perda ao fogo que está diretamente ligado com a presença de carbono residual e com diminuição da reatividade do material apontando uma necessidade de moagem para alcançar maior homogeneidade do material e maior superfície específica

4.2 Massa Específica

A massa específica da CBCA foi calculada por método empírico e os resultados são apresentados na Figura 11.

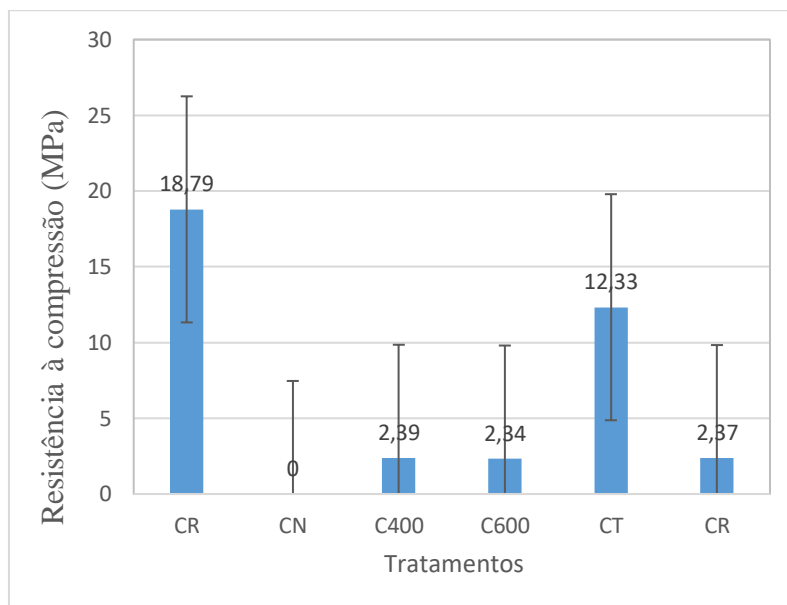


Figura 11 – Massa específica das argamassas.
Fonte: Autora (2020).

Na Figura 11 observa-se que as C600 e as CT apresentaram o mesmo valor de $1,34 \text{ g/cm}^3$, enquanto a C400 apresentou valor inferior, $0,5 \text{ g/cm}^3$, e as CN e CR obtiveram $1,02 \text{ g/cm}^3$ e $1,91 \text{ g/cm}^3$, respectivamente.

Com a finalidade de comparação, Neville (2016) apresenta a massa específica das cinzas $2,35 \text{ g/cm}^3$, portanto, distinto dos valores obtidos no trabalho. Essa discrepância dos valores obtidos e da literatura é justificado pela existência de diferentes tratamentos. As cinzas calcinadas à 400°C por 3 horas (C400) e as cinzas requeimadas (CR) apresentam a menor e maior massa específica, respectivamente.

4.3 Finura – Peneira $75 \mu\text{m}$ (nº200)

A finura das CBCA foi determinada pelo método adaptado da NBR 11579 (2012). Os resultados obtidos estão expostos na Tabela 6.

Tabela 6 – Índice de finura das CBCA sob diferentes tratamentos.

Tratamentos cinzas	Massa retida (g)	Índice de Finura (%)
CN	44,235	88,47
C400	42,210	84,72
C600	38,725	77,45
CT	26,425	52,49
CR	26,187	52,37

Fonte: Autora (2020).

Costa *et al.* (2011) citam que para o cimento ser considerado fino deve ter no máximo 15 g retido na peneira 75 μm (n°200). Sendo assim, observa-se que as CBCA não se enquadram nesta categoria, já que nenhum dos tratamentos obtiveram massas retidas inferiores à 15 g. Para tornar o material fino, uma possível solução, seria realizar em combinação de tratamentos no processo de moagem para reduzir a área específica das partículas das cinzas.

Vale ressaltar, que os tratamentos CT e CR obtiveram menores índices de finura, 52,49 e 52,37%, respectivamente, portanto, sob esse aspecto, mais indicados para substituição parcial do cimento pela CBCA

4.4 Índice de Atividade Pozolânica - Método Cimento aos 28 dias

A Tabela 13 apresenta as resistências à compressão aos 28 dias das argamassas referência e com CBCA submetida à diferentes tratamentos e os índices de atividade pozolânica (IAP).

Tabela 7 – Resistência à compressão das argamassas referência e com CBCA submetida à diferentes tratamentos e o índice de atividade pozolânica (IAP) das CBCA.

Tratamentos cinzas	Resistencia à Compressão (Mpa) 28 dias	IAP (%)
CB ^b	18,79	-
CN	a	a
C400	2,39	12,72
C600	2,32	12,34
CR	12,33	65,62
CT	2,37	12,61

^a Não obteve trabalhabilidade suficiente para moldagem do corpo de prova.

^b CB – Argamassa referência.

Fonte: Autora (2020).

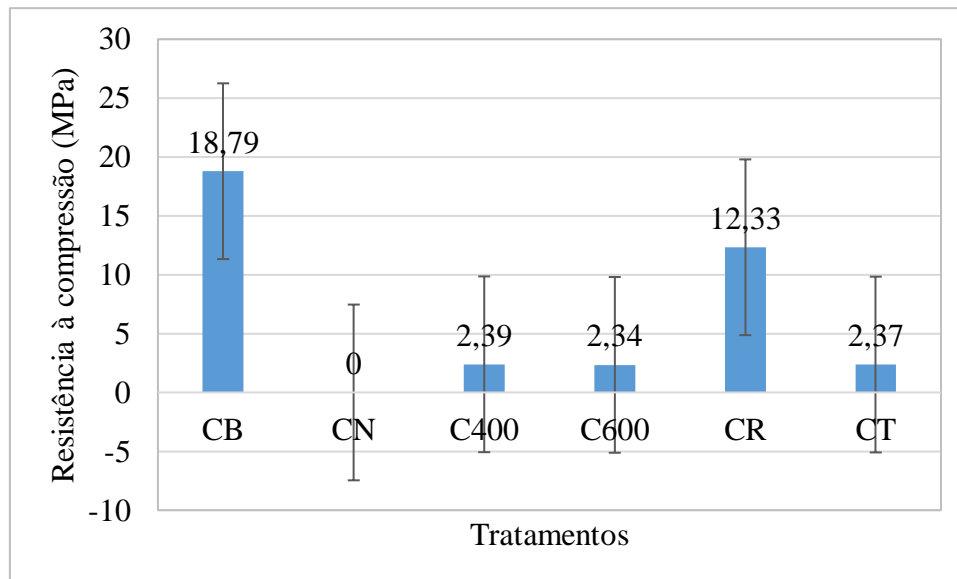


Figura 12– Resistência média das argamassas.
Fonte: Autora (2020).

Segundo Singh *et al.*, (2000), a utilização de matrizes cimentícias com substituição de 10% de CBCA, apresentaram a resistência à compressão 30% maior em relação a pasta referência. Nesse trabalho foi substituído 25% da massa do cimento pelas CBCA que justifica a redução da resistência à compressão. A baixa densidade das CBCA, requer maior volume desse material na moldagem das argamassas, interferindo na relação água/cimento, na trabalhabilidade e na porosidade da argamassa.

Para a determinação do IAP é necessário relacionar as resistências à compressão das argamassas com cinzas submetidas aos tratamentos com a argamassa referência. Os dados apresentados demonstram que houve uma discrepância significativa dos resultados, sendo que a CBCA requeimada obteve o maior índice de atividade pozolânica (IAP), 65,62%, enquanto as cinzas calcinadas à 400°C e 600°C e a CBCA triturada obtiveram valores próximos entre si, porém inferiores ao tratamento da requeima, sendo 12,72%, 12,34% e 12,61%, respectivamente. Além do maior IAP, as cinzas requeimadas obtiveram massa específica superior as demais CBCA tratadas 1,91 g/cm³ e a única que atingiu coloração clara que indica menor quantidade de carbono presente na amostra, que interfere diretamente no aumento do índice da atividade pozolania.

A NBR 12653 (ABNT, 2014) determina que para um material ser classificado como pozolânico, o IAP deve ser superior ou igual à 90%. Portanto, nenhum tratamento das CBCA tornou o material pozolânico.

As possíveis interferências no IAP referem-se as condicionantes do ensaio de resistência à compressão, como umidade do ar, adensamento manual do corpo de prova,

alteração da relação água/cimento devido a umidade da argamassadeira, o tempo de mistura dos materiais constituintes da argamassa, a superfície de contato do corpo de prova e da prensa, entre outros fatores que tornam os resultados suscetíveis a variações.

Para que as CBCA se tornem pozolanas sua granulometria deve ser fina o suficiente para que ocorra o efeito fíler. Assim, a granulometria pode interferir na diminuição da porosidade e por consequência aumento da resistência à compressão, como menciona Mehta e Monteiro, 2014. Porém, de acordo com o ensaio de finura, nota-se que as partículas das CBCA não apresentaram granulometria satisfatória.

4.6 Índice da Atividade Pozolânica – Método Chapelle Modificado

A Figura 13 apresenta o IAP obtido pelo método Chapelle modificado.

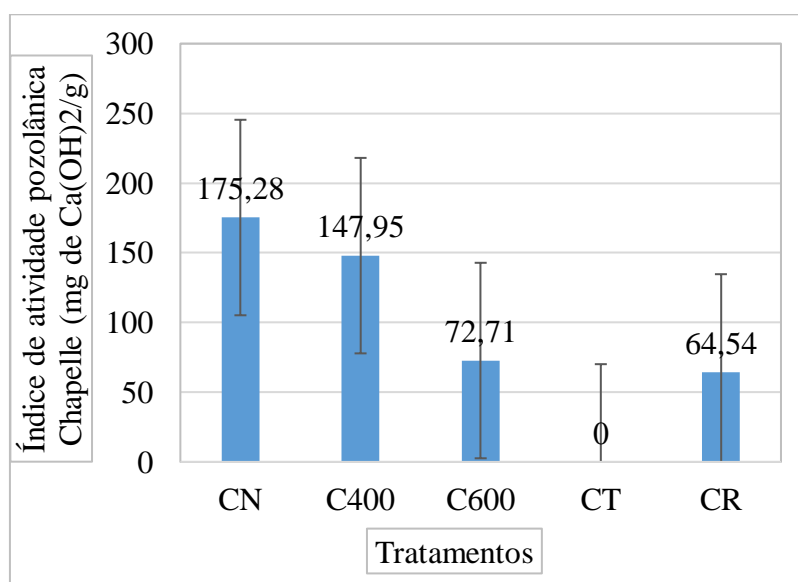


Figura 13 – Índice de atividade pozolânica pelo método Chapelle modificado.

Fonte: Autora (2020).

Raverdy *et al.*, (1980), propõe que o valor mínimo do consumo de hidróxido de cálcio para o material ser classificado como pozolânico é de 330 mg CaO/g. No entanto, pode ser observado que nenhum dos tratamentos atingiu essa categoria já que todos os valores se encontraram abaixo desse valor.

Acredita-se que muitos fatores interferiram nesses resultados como a granulometria das partículas, superfície específica e a composição química das cinzas. Observa-se que os resultados obtidos estão em discordância com os resultados atingidos

por Cordeiro *et al.* (2009) pois as CBCA que tiveram o tratamento de calcinação de 600°C por 3 h, apresentou um consumo de 421 mg CaO/g.

Observa-se que os dados inferiores a 330 mg CaO/g podem relacionar-se com a quantidade de material cristalino na amostra e nota-se que as CT e CR apresentam valores inferiores e isso pode associar a sua estrutura cristalina (SANTOS, 2017).

Segundo Silva *et al.* (2019) através da análise química por fluorescência de raios X, observou-se que devido a alcalinidade presente nas CBCA, quando em contato com a água, forma-se uma base, que é o hidróxido de cálcio ($\text{Ca}(\text{OH})_2$). Sendo assim, o método do Chapelle é baseado no índice de hidróxido de cálcio fixado e devido as CBCA já o possuírem em sua composição, altera-se a alcalinidade da mistura interferindo no valor obtido.

4.7 Comparativo dos Métodos - Cimento aos 28 dias e Chapelle Modificado

Ao comparar os dois métodos, cimento aos 28 dias e Chapelle modificado, deve-se pontuar alguns aspectos, sabendo que ambos são normatizados, válidos e amplamente utilizados para determinar o IAP. Em relação ao tempo de execução do ensaio, percebe-se que o método do Chapelle modificado se apresenta mais vantajoso pois requer menor tempo para realizar o ensaio e para obter o resultado.

Em relação a confiabilidade de dados, o método do Chapelle apresenta-se mais viável pois sofre menos interferência do meio ambiente e dos processos de execução do ensaio. O método do desempenho do cimento Portland aos 28 dias sofre interferência da temperatura ambiente, da umidade do ar, da preparação da mistura, do adensamento dos corpos de prova, da argamassadeira, da cura, velocidade da prensa, entre outros. Enquanto o Chapelle modificado trata-se de um método que sofre menos interferência do ambiente pois não entra em contato com o ar.

Ambos métodos, desempenho do cimento Portland aos 28 dias e Chapelle modificado, requerem no que diz respeito aos materiais necessários nos ensaios, ambos os ensaios têm suas particularidades na preparação dos mesmos, entretanto o método do Cimento aos 28 dias é mais vantajoso pois os materiais necessários podem ser adquiridos em lojas de materiais de construção e já o Chapelle modificado exige uma licença para adquirir os reagentes químicos.

O método cimento aos 28 dias não permitiu analisar a atividade pozolânica das cinzas *in natura* (CN) pois devido à sua baixa densidade, o volume de cinzas foi maior,

interferindo na relação água/cimento e na baixa trabalhabilidade, mesmo com a adição de superplastificantes. Enquanto o método Chapelle modificado permitiu a análise de todos os tratamentos das CBCA.

De acordo com Regô (2000) existem vários ensaios para determinar o IAP dos materiais que justifica a dificuldade de selecionar uma metodologia para todos os tipos de materiais pozolânicos ou com potencial. Tal fato, relaciona-se à heterogeneidade dos materiais analisados, tendo a necessidade de estudar pelo menos dois métodos diferentes para comparar os resultados.

5 CONCLUSÃO

Por meio da realização deste trabalho constatou-se a que não houve a possibilidade de incorporação das CBCA em argamassas, ressaltando que, a quantidade de material empregado interfere nas suas propriedades. Com as argamassas produzidas com o traço de 25% de substituição percebeu-se que nenhum dos tratamentos atingiu as exigências mínimas para serem considerados como materiais pozolânicos.

Constatou-se que o tratamento da requeima empírica apresentou o melhor resultado em relação ao método da análise do Desempenho da Atividade Pozolânica aos 28 dias, e acredita-se que tem ligação direta com o alto teor de carbono presente nas cinzas de cana-de-açúcar, já que o único tratamento que conseguiu parcialmente essa aparência, seria viável realizar um tratamento mais eficaz em relação a esse problema.

Apesar do material não ter se enquadrado nas exigências das NBR 5752 (2012) e da NBR 15895 (2010) para ser caracterizado como material pozolânico, percebe-se uma divergência dos resultados encontrados de outras pesquisas, sendo assim acredita-se no potencial pozolânico das CBCA. Observa-se que provavelmente, as granulometrias das partículas podem ter interferido diretamente nos resultados e uma possibilidade seria após a requeima da CBCA realizar a moagem e o peneiramento para aumentar a pozolanicidade.

Em relação aos dois métodos para a determinação do Índice de Atividade Pozolânica, foi constatado que o método do Desempenho da Atividade Pozolânica aos 28 dias, está mais sujeito a interferências e erros, já que sua eficiência depende de muitos fatores externos como temperatura ambiente, moldagem, adensamento, tempo de cura, mistura e a necessidade da argamassadeira já estar úmida para não interferir na relação água/cimento.

Portanto, com base nas análises e ensaios realizados, comprovou-se que o melhor tratamento foi a requeima empírica das CBCA e o melhor método de teste foi o Chapelle modificado porém percebe-se que o alto teor de alcalinidade podem tornar esse método de análise inviável para constatar o índice de atividade pozolânica das CBCA. Apesar dos resultados negativos, acredita-se que com o tratamento certo, as CBCA podem ser utilizados como um método econômico e sustentável para o seu descarte.

Para trabalhos futuros sugere-se:

- Análise de Variância (ANOVA) dos resultados obtidos;

- Realizar processo de moagem das CBCA em um moinho de bolas e verificar a influência da granulometria da partícula na resistência de argamassas;
- Verificar as condições químicas e físicas impostas pela NBR 12653 (ABNT, 2012) da CBCA:
- Realizar tratamento com maior eficiência em remoção de teor de carbono;
- Testar as CBCA com diferentes porcentagens de substituição de cimento;
- Realizar a análise de fluorescência de raios X e a de difração de raios X;
- Remover a alcalinidade no método do Chapelle modificado.

REFERÊNCIAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 18:** Cimento Portland - Análise química - Determinação de perda ao fogo. Rio de Janeiro, 1992.

._____**NBR 23:** Cimento portland e outros materiais em pó - Determinação da massa específica. Rio de Janeiro, 2000.

._____**NBR 76:** Cimento portland - Determinação da finura pelo método de permeabilidade ao ar (Método de Blaine). Rio de Janeiro, 1998.

._____**NBR 5738:** Cimento portland - Determinação da finura pelo método de permeabilidade ao ar (Método de Blaine). Rio de Janeiro, 1998.

._____**NBR 5752:** Materiais pozolânicos – Determinação do Índice de desempenho com cimento Portland aos 28 dias. Rio de Janeiro, 2014.

._____**NBR 7214:** Areia normal para ensaio de cimento- Especificação. Rio de Janeiro, 2015.

._____**NBR 11578:** Cimento Portland Composto . Rio de Janeiro, 1991.

._____**NBR 11579:** Cimento Portland: Determinação da finura por meio da peneira 75 µm (n° 200). Rio de Janeiro, 2012.

._____**NBR 12653:** Materiais Pozolânicos. Rio de Janeiro, 2014.

._____**NBR 15895:** Materiais Pozolânicos - Determinação do teor de hidróxido de cálcio fixado – Método Chapelle modificado . Rio de Janeiro, 2010.

BRASIL. Ministério do Meio Ambiente. CONSELHO NACIONAL DO MEIO AMBIENTE – CONAMA. **Resolução nº 313, de 29 de outubro de 2002.** Brasília DF, n. 226, 22 de novembro de 2002. Seção 1, p. 85-91.

BARROSO, T. R. **Estudo da Atividade Pozolânica e da Aplicação em Concreto de Cinzas do Bagaço de Cana-de-Açúcar com Diferentes Características Físico-Químicas.** 2011. 146 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Civil, Universidade Estadual do Norte Fluminense, Rio de Janeiro, 2011.

CAMPANHA NACIONAL DE ABASTECIMENTO – CONAB (Brasil). **Acompanhamento da Safra Brasileira: Cana-de-açúcar.** Brasília: Observatório Agrícola, 2018. 66 p.

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 f. Tese (Doutorado) - Curso de Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2006.

COSTA, F. L. SILVA, A. J. P; SOUSA, W. R. V. **Blocos vazados modulares de concreto inovado com adição de cinzas do bagaço da cana de açúcar**. In: CONGRESSO BRASILEIRO DO CONCRETO, 53., 2011, Florianópolis. **Anais...** Florianópolis: Ibracon, 2011. v. 1, p. 1 - 13.

Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística – IBEG (Brasil). **Levantamento Sistemático da Produção Agrícola – LSPA**. Rio de Janeiro: Coordenação de Agropecuária, 2019. 111 p.

LIMA, Sofia Araújo. **Análise da viabilidade do uso de cinzas agroindustriais em matrizes cimentícias: estudo de caso da cinza da casca da castanha de caju**. 2008. 160 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Arquitetura e Urbanismo, Departamento de Arquitetura e Urbanismo da Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2008.

LIMA, Sofia Araújo; ROSSIGNOLO, João Adriano. **Análise da pozolanicidade da cinza da casca da castanha do caju pelo método de difratometria de raios X**. Scielo, Rio de Janeiro, v. 14, p.1-12, 21 nov. 2009.

MACEDO, P. C. **Avaliação do desempenho de argamassas com adição de cinza do Bagaço de cana-de-açúcar**. 2009. 116 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Faculdade de Engenharia, Universidade Estadual Paulista, Ilha Solteira, 2009.

MEHTA, P. K.; MONTEIRO, P. J. M. **Concreto: Microestrutura, Propriedades e Materiais**. São Paulo: IBRACON, 2014.

Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento – MAPA 2019 Disponível em: <http://www.agricultura.gov.br/assuntos/sustentabilidade/agroenergia/arquivos-producao/001PRODUOBRASILEIRADECANADEACARACAREETANOL_24042019.pdf>. Acesso em 03/04/2019.

PEREIRA, A. M. **Análise da viabilidade da utilização da cinza do bagaço de cana-de-açúcar como aglomerante para a produção de matrizes cimentantes**. 2014. 207 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Civil, Universidade Estadual Paulista. Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira, Ilha Solteira, 2014.

RAVERDY, M., BRIVOT, F., PAILLÈRE, A. M., BRON, R.. “**Appréciation de l’activité pouzzolanique de constituents secondaires**”. Congrès International de la Chimie des Ciments, Paris, France, v. 3, pp. 36-41, 1980.

RÊGO, J. H. S.; NEPOMUCENO, A. A.; FIGUEIREDO, E. P. **A utilização da cinza de casca de arroz residual (CCA residual) como adição mineral ao cimento em concretos**. Anais [...]. In: 44º Congresso Brasileiro do Concreto, 2002, Belo Horizonte.

SALES, A., LIMA, S. A. “**Use of Brazilian sugarcane bagasse ash in concrete as sand replacment**”, Waste Management, in press. 2010.

SANTOS, T. A. **Avaliação do potencial calorífico do bagaço de cana-de- açúcar e da atividade pozolânica das cinzas geradas**. 2017. 167 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Ambiental Urbana, Universidade Federal da Bahia Escola Politécnica, Salvador, 2017.

SILVA, Emerson José da et al. Avaliação por análise de DRX da influência do beneficiamento de moagem na atividade pozolânica da cinza do bagaço de cana-de-açúcar. **SciELO**, Rio de Janeiro, v. 244, n. 4, p.1-12, 25 nov. 2019.

SINDICATO NACIONAL DA INDÚSTRIA DO CIMENTO - **SNIC** 2016 Disponível em: < <http://snic.org.br/numeros-do-setor.php>>. Acesso em mai. 2019.

SINGH, N. B., SINGH, V. D., RAI, S., 2000, Hydration of bagasse ash-blended Portland cement. **Cement and Concrete Research**, v. 30, n. 9, pp. 1485-1488.