CENTRO FEDERAL DE EDUCAÇÃO TECNOLÓGICA DE MINAS GERAIS

DIRETORIA DE PESQUISA E PÓS-GRADUAÇÃO

PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL

ANDRÉ BARROSO MOURÃO

EFEITOS DAS CINZAS DO BAGAÇO DA CANA-DE-AÇÚCAR DA PRODUÇÃO DE CACHAÇA ARTESANAL EM SUBSTITUIÇÃO PARCIAL AO CIMENTO NAS PROPRIEDADES DAS ARGAMASSAS CIMENTÍCIAS

BELO HORIZONTE

2021

ANDRÉ BARROSO MOURÃO

EFEITOS DAS CINZAS DO BAGAÇO DA CANA-DE-AÇÚCAR DA PRODUÇÃO DE CACHAÇA ARTESANAL EM SUBSTITUIÇÃO PARCIAL AO CIMENTO NAS PROPRIEDADES DAS ARGAMASSAS CIMENTÍCIAS

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil do Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais como requisito para obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil.

Orientadora: Profª. Dra. Júnia Nunes de Paula

BELO HORIZONTE

2021

Mourão, André Barroso
M929e Efeitos das cinzas do bagaço da cana-de-açúcar da produção de cachaça artesanal em substituição parcial ao cimento nas propriedades das argamassas cimentícias / André Barroso Mourão. – 2021.
87 f. : il., gráfs, tabs., fotos.

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Civil.
Orientadora: Júnia Nunes de Paula.
Bibliografia: f. 81-87.
Dissertação (mestrado) – Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais, Departamento de Engenharia Civil

1. Argamassas – Teses. 2. Agregados (materiais de construção) – Teses. 3. Cinza de bagaço de cana – Avaliação – Teses. 4. Cimento reforçado com fibras – Teses. 5. Construção sustentável – Teses. I. Paula, Júnia Nunes de. II. Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais. Departamento de Engenharia Civil. III. Título.

CDD 691.3

Elaboração da ficha catalográfica pela bibliotecária Jane Marangon Duarte, CRB 6º 1592 / Cefet/MG

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus, por sempre me dar força e saúde para seguir em minha caminhada. Agradeço a minha família e amigos, por todo apoio, carinho e incentivo, à Professora Júnia Nunes de Paula, por toda orientação, parceria e amizade.

Agradeço ao Professor Augusto Cesar da Silva Bezerra, por toda parceria e disponibilidade para a realização da presente pesquisa.

Agradeço ao amigo Ivan Batista de Morais, servidor do CEFET-MG Campus II, por toda ajuda oferecida para a execução dos ensaios.

Tenho muita gratidão ao Jorge, servidor do CEFET-MG Campus I, por toda ajuda oferecida na execução de ensaios.

Agradeço à Lafarge Holcim, em especial ao Luciano, pela doação de cimento.

Tenho muita gratidão a todos os servidores, colegas e professores do CEFET-MG, que de maneira direta ou indireta, contribuíram para que a realização da presente pesquisa fosse possível.

Agradeço a CAPES e ao CEFET-MG, pelo financiamento do presente trabalho.

RESUMO

A indústria do cimento responde por aproximadamente 7% das emissões globais de CO_2 inerentes à ação humana devido, principalmente, ao grande consumo de energia e volume de emissões decorridos da produção do clínquer, principal constituinte do cimento Portland. Os materiais cimentícios suplementares (MCS) são alternativas sustentáveis para a redução desses impactos, pois melhoram algumas propriedades dos compostos cimentícios e podem ser usados como substituição parcial ao cimento, reduzindo assim o consumo de clínquer. A cinza de bagaço de cana-de-açúcar (CBCA) é uma alternativa de MCS por ser um resíduo da indústria sucroalcooleira rica em sílica amorfa, o que pode acarretar melhorias nas propriedades de argamassas e concretos.O presente estudo objetiva avaliar os efeitos da substituição parcial do cimento pela CBCA nas propriedades mecânicas e físicas das argamassas. As cinzas foram coletadas na Decisão, empresa fabricante de cachaça artesanal, localizada em Sabinópolis-MG. Duas amostras de cinzas foram utilizadas, a CBCA-M, cinza submetida ao procedimento de moagem, e a CBCA-MR, submetida à moagem e requeima. O procedimento de moagem foi o mesmo para as duas amostras e a requeima ocorreu sob temperatura de 600 ºC, durante 3 horas. A atividade pozolânica das cinzas foi avaliada por meio do ensaio de Índice de Atividade Pozolânica (IAP) conforme NBR 5752 (ABNT, 2014) e pelo método de condutividade proposto por Luxán *et al* (1989). Os tempos de pega das pastas e o índice de consistência das argamassas foram estudados por meio dos ensaios de tempo de início e fim de pega e *flow table test*, respectivamente. Foram produzidas argamassas de referência e com 10% e 20% de substituição (em volume) do cimento pelas duas amostras de CBCA para a realização dos seguintes ensaios: resistência à compressão (7, 28 e 91 dias); resistência à tração (28 dias); índice de absorção de água por imersão. Os resultados evidenciam que a CBCA-M e a CBCA-MR são materiais não pozolânicos, a adição das cinzas não prejudicou a resistência à tração das argamassas e, para a resistência à compressão, as argamassas com 10% de CBCA-MR obtiveram desempenho semelhante à referência. Quanto ao índice de absorção, a adição de cinzas com granulometria mais grossa do que o cimento produziu argamassas com maior porosidade aberta à água.

Palavras-chave: Sustentabilidade, cinza de bagaço de cana-de-açúcar, CBCA, resíduos, argamassa.

ABSTRACT

The cement industry accounts for approximately 7% of the global CO_2 emissions inherent to human action due mainly to the high energy consumption and volume of emissions elapsed from the production of clinker, the main constituent of Portland cement. Supplemental Cementitious Materials (SCM) are sustainable alternatives to reduce these impacts, as they improve some properties of cementitious compounds and can be used as a partial replacement to cement, thus reducing clinker consumption. Sugarcane bagasse ash (SCBA) is an alternative to SCM because it is a residue of the sugar-alcohol industry rich in amorphous silica, which can lead to improvements in the properties of mortars and concrete. The present study aims to evaluate the effects of partial cement substitution by CBCA on the mechanical and physical properties of mortars. The ashes were collected in Decisão, a company that manufactures artisanal cachaça, located in Sabinópolis-MG. Two ash samples were used, SCBA-G, ash submitted to the grinding procedure, and SCBA-GR, submitted to grinding and reburning. The grinding procedure was the same for both samples and the reburning occurred at a temperature of 600ºC for 3 hours. The pozolanic activity of the ashes was evaluated by the Pozolanic Activity Index (API) assay according to NBR 5752 (ABNT, 2014) and by the conductivity method proposed by Luxán*et al* (1989). The setting times of the pastes and the consistency index of the mortars were studied by means of the start and end setting times and flow table test tests, respectively.Reference mortars were produced with 10% and 20% replacement (by volume) of cement by the two SCBA samples for the following tests: compressive strength (7, 28 and 91 days); tensile strength (28 days); water absorption index by immersion. The results show that SCBA-G and SCBA-GR are non-pozolanic materials, the addition of ashes didn't impair the tensile strength of mortars and, for compressive strength, mortars with 10% SCBA-GR obtained similar performance to the reference. As for the absorption index, the addition of ash with coarser granulometry than cement produced mortars with higher porosity open to water.

Keywords: Sustainability, sugarcane bagasse ash, SCBA, waste, mortar.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Processo de hidratação ao longo do tempo. 18
Figura 2 - Diagrama esquemático do desenvolvimento estrutural no decorrer da hidratação do cimento Portland. 18
Figura 3 - Tipos de adições minerais.....20
Figura 4 - Fluxograma de produção da cachaça brasileira. 28
Figura 5 - Cachaças Decisão (versão prata) e Sabicana(versão ouro). 34
Figura 6 - Amostra de CBCA coletada. 45
Figura 7 - Material retido (esquerda) e passante (direita) na peneira #4,75 da CBCA. 46
Figura 8 - Moinho de bolas cerâmicas com CBCA. 46
Figura 9 - Difratômetro de Raios-X. 48
Figura 10 - Equipamento para ensaio de Granulometria a Laser. 49
Figura 11 - Ensaio de condutividade (Luxán) 52
Figura 12 - Mesa para o ensaio de Índice de Consistência. 54
Figura 13 - CBCA *in natura(*a), retida e passante(b) e peneirada na malha 600µm. 58
Figura 14 - Aspecto visual da CBCA-M (a) e da CBCA-MR (b). 59
Figura 15 - Imagens microscópicas da CBCA *in natura*. 59
Figura 16 - Imagens da CBCA *in natura* com ampliação de 200X, 500X e 1000X. 60
Figura 17 - Matéria orgânica identificada na CBCA *in natura*.....60
Figura 18 - Imagens da CBCA-M com ampliação de 50X, 200X e 500X. 61
Figura 19 - Imagens da CBCA-M com ampliação de 200X, 500X e 1000X. 61
Figura 20- Imagens da CBCA-MR com ampliação de 50X, 200X e 500X. 62
Figura 21 - Imagens da CBCA-MR com ampliação de 200X, 500X e 1000X.....62
Figura 22 - Difratogramas da CBCA-M e CBCA-MR 64
Figura 23 - Distribuição granulométrica do cimento, CBCA-M e CBCA-MR.....65
Figura 24 - Resultados para Ensaio de Compressão 72
Figura 25 - Evolução da resistência à compressão com o tempo 73
Figura 26 - Resultados para ensaio de tração por compressão diametral. 75

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Composições do cimento Portland. 15
Tabela 2 - Designação normalizada, sigla e classe de cimento Portland. 16
Tabela 3 - Requisitos químicos para material pozolânico. 23
Tabela 4 - Requisitos químicos para material pozolânico. 23
Tabela 5 - Etapas da produção de Açúcar e Etanol. 27
Tabela 6 - Modificações do bagaço em função da temperatura. 32
Tabela 7 - Teor de sílica da CBCA, por diversos autores 33
Tabela 8 - Premiações da cachaçaria Decisão 34
Tabela 9–Caracterização física do cimento CP V - ARI 43
Tabela 10 - Caracterização química do cimento CP V ARI 44
Tabela 11 - Massa Específica das CBCAs e cimento CP V ARI 53
Tabela 12 - Dosagens das argamassas 53
Tabela 13 - Composição química e perda ao fogo das amostras de CBCA. 62
Tabela 14 - Distribuição granulométrica do cimento, CBCA-M e CBCA-MR 65
Tabela 15 - Massa Específica CBCA-M, CBCA-MR e cimento. 66
Tabela 16 - Resultados dos Tempos de Pega 66
Tabela 17 - Resultados da atividade pozolânica 68
Tabela 18 - Resultados de condutividade (Luxán) 68
Tabela 19 - Resultados do Índice de Consistência 69
Tabela 20 - Análise estatística dos resultados de Índice de Consistência 70
Tabela 21 - Resultados para Ensaios de Compressão 71
Tabela 22 - Análise estatística dos resultados de resistência à compressão 72
Tabela 23 - Resultados para ensaios de tração 75
Tabela 24 - Análise estatística dos resultados de resistência à tração 75
Tabela 25 - Resultados para Índice de Absorção 76

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

CBCA – Cinza de bagaço de cana-de-açúcar

CBCA-M - Cinza de bagaço de cana-de-açúcar moída

CBCA-MR - Cinza de bagaço de cana-de-açúcar moída e requeimada

CM – argamassa ou pasta de cimento com adição de CBCA-M

CMR – argamassa ou pasta de cimento com adição de CBCA-MR

CP – Corpo de prova

CP I – Cimento Portland Comum sem adição

CP –S – Cimento Portland Comum com adição

CP II-E – Cimento Portland com escória granulada de alto forno

CP II-F – Cimento Portland com material carbonático

CP II-Z – Cimento Portland com material pozolânico

CP III – Cimento Portland de alto-forno

CP IV – Cimento Portland pozolânico

CP V – Cimento Portland de alta resistência inicial

CPB – Cimento Portland Branco

Kg – quilograma

MCS – Material Cimentício Suplementar

MJ – Mega Joule

MPa – Mega Pascal

MPa/s – Mega Pascal por segundo

Rpm – Rotações por minuto

SCBA – Sugar cane bagasse ash

SCBA-G – Ground sugar cane bagasse ash

SCBA-GR – Ground and reburned sugar cane bagasse ash

µm – Micrômetro

LISTA DE SÍMBOLOS

CaO – óxido de cálcio

Ca^{2+}- íons cálcio

CH – hidróxido de cálcio

CO – monóxido de carbono

CO_2– dióxido de carbono

C-S-H – silicato de cálcio hidratado

C_2S – silicato dicálcico

C_3A – aluminato tricálcico

C_3S – sulfato tricálcico

C_4AF – ferroaluminatotetracálcico

He – Hélio

K_2O – óxido de potássio

NO_2 - dióxido de nitrogênio

NO_X – óxidos de nitrogênio

$(OH)^-$ - íons hidroxila

SiO_2 – dióxido de silício (sílica)

SO_2 – dióxido de enxofre

^oC – graus Celsius

SUMÁRIO

AGRADECIMENTOS **8**
RESUMO **9**
ABSTRACT **10**
LISTA DE FIGURAS **11**
1 INTRODUÇÃO **11**
1.1 PERGUNTA DE PESQUISA 12
1.2 OBJETIVOS 12
1.3 JUSTIFICATIVA DA PESQUISA 12
1.4 RESTRIÇÕES E LIMITAÇÕES DA PESQUISA 13
2 REVISÃO TEÓRICA **14**
2.1 CIMENTO PORTLAND 14
2.1.1 Processo produtivo e composição química **14**
2.1.2 Classificações do cimento Portland **15**
2.1.3 Hidratação do cimento **17**
2.2 ADIÇÕES MINERAIS 19
2.2.1 Definição **19**
2.2.2 Tipos de adições minerais **20**
2.2.3 Classificação das pozolanas **22**
2.2.4 Reação pozolânica **24**
2.2.5 Métodos para avaliação da atividade pozolânica **25**
2.3 ATIVIDADE SUCROALCOOLEIRA 26
2.3.1 Cana-de-açúcar **26**
2.3.2 Produção de álcool e açúcar **27**
2.3.3 Produção da Cachaça **28**
2.3.4 Subprodutos **30**
2.4 CBCA (Cinza do bagaço de cana-de-açúcar) 31
2.4.1 Volume de Produção e Impactos **31**
2.4.2 Características **31**
2.4.3 Cachaça Decisão **34**
2.5 INCORPORAÇÃO DA CBCA EM MATERIAIS CIMENTÍCIOS 35

2.5.1 Processamento da CBCA 35
2.5.2 Tempos de pega 36
2.5.3 Trabalhabilidade 37
2.5.4 Resistência mecânica 38
2.5.5 Porosidade 40
3 MATERIAIS E MÉTODOS 43
3.1 MATERIAIS 43
3.1.1 Cimento Portland 43
3.1.2 CBCA 44
3.1.3 Agregado Miúdo 45
3.1.4 Água 45
3.2 MÉTODOS 45
3.2.1 Processamento das amostras de CBCA 45
3.2.2 Caracterização das amostras de CBCA 47
3.2.3 Caracterização do Cimento Portland 50
3.2.4 Tempos de pega 50
3.2.5 Atividade Pozolânica 51
3.2.6 Confecção das argamassas 53
3.2.7 Índice de Consistência 54
3.2.8 Resistência à Compressão Axial 55
3.2.9 Resistência à Tração por Compressão Diametral 55
3.2.10 Absorção de Água por Imersão 56
4 RESULTADOSE DISCUSSÃO 58
4.1 RESULTADOS DE CARACTERIZAÇÃO 58
4.1.1 Caracterização visual da CBCA 58
4.1.2 Análise microscópica 59
4.1.3 Espectroscopia por fluorescência de raios X (FRX) e Perda ao fogo 62
4.1.4 Estrutura Cristalina por Difração de Raios X (DRX) 64
4.1.5 Distribuição granulométrica 65
4.1.6 Massa específica 66
4.2 TEMPO DE PEGA 66

4.3 ATIVIDADE POZOLÂNICA....68

4.4 ARGAMASSAS....69

4.4.1 Índice de Consistência....69

4.4.2 Resistência à Compressão....71

4.4.3 Resistência à Tração por Compressão Diametral....75

4.4.4 Índice de Absorção por Imersão....76

5 CONCLUSÕES....78

6 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS....81

1 INTRODUÇÃO

O Cimento Portland Comum é produzido a partir da mistura e aquecimento de calcário, argilas e pequenas proporções de outros materiais sob a temperatura de 1450º C, obtendo-se como resultado um cimento com 95% de clínquer (em massa) (FAIRBAIRN *et al*., 2010). A fabricação do clínquer envolve a calcinação e descarbonatação da matéria-prima, procedimentos que requerem grande consumo energético e queima de combustível, o que resulta na emissão de vários gases poluentes. Dessa forma,cerca de 90% do CO_2 emitido durante a cadeia produtiva do cimento é correspondente ao processo de produção do clínquer (ABCP, 2012).

A indústria do cimento responde por aproximadamente 7% das emissões globais de CO_2 inerentes à ação humana e, no ano de 2018, cada tonelada de cimento produzida no mundo resultou na emissão de 634 kg de CO_2 na atmosfera (SNIC, 2019). Além disso, a produção de uma tonelada de cimento consome em média 1,6 toneladas de recursos naturais (BULLARD *et al*., 2011).

A redução do volume de emissão de carbono inerente à cadeia produtiva do cimento passa por duas estratégias principais: ampliação do uso de materiais cimentícios suplementares (MCS) com baixo CO_2 associado como substituição parcial ao clínquer e o uso mais eficiente do cimento Portland em argamassas e concretos (SCRIVENER; JOHN; GARTNER, 2018).

A cinza do bagaço da cana-de-açúcar (CBCA) é uma alternativa de MCS, pois esse subproduto da indústria sucroalcooleira pode conter alto teor de sílica amorfa.Essa característica favorece seu uso como material pozolânico, contribui para a melhoria das propriedades dos compostos cimentícios e reduz a pegada de carbono associada à cadeia produtiva do cimento (BEZERRA et al., 2017; PAYÁ et al., 2002).

Cada tonelada de cana-de-açúcar explorada gera 250 kg de bagaço e sua queima para a cogeração de energia resulta em aproximadamente 6 kg de cinzas (FIESP, 2001). Caso sejam abandonadas a intempéries ou dispostas de maneira inadequada, a CBCA pode causar danos ambientais e à saúde humana (FRÍAS; VILLAR; SAVASTANO, 2011). Portanto, o reaproveitamento da CBCA como material cimentício suplementar reduziria o consumo do clínquer, como também minimizaria os impactos ambientais provenientes da disposição inadequada das cinzas.

Diante do exposto, a presente pesquisa visa avaliar os efeitos da substituição

parcial do cimento Portland pela CBCA originária da produção da cachaça artesanal sobre as propriedades das argamassas. Foram utilizadas duas amostras de cinzas originárias da produção da cachaça artesanal: CBCA-M, amostra submetida apenas à moagem, e CBCA-MR, amostra submetida à moagem e requeima.

Vale ressaltar que a literatura existente sobre o tema contém muitos estudos sobre a reutilização da CBCA em materiais cimentícios, fazendo-se uso de cinzas originárias de grandes indústrias da produção de álcool e açúcar. Já o presente estudo traz como novidade o reaproveitamento da CBCA oriunda da produção da cachaça artesanal.

1.1 PERGUNTA DE PESQUISA

A questão da presente pesquisa é: qual a influência da substituição parcial do cimento Portland pela CBCA oriunda da produção da cachaça artesanal sobre as propriedades mecânicas e propriedades físicas das argamassas cimentícias?

1.2 OBJETIVOS

O objetivo geral da pesquisa é investigar os efeitos da substituição parcial do cimento pela CBCA sobre as propriedades das argamassas cimentícias. Para que o objetivo geral possa ser alcançado, foram traçados os seguintes objetivos específicos:

- Avaliação da atividade pozolânica das amostras de CBCA;
- Avaliação do comportamento mecânico das argamassas com substituição parcial do cimento por CBCA;
- Avaliação da porosidade aberta de argamassas produzidas com a substituição parcial do cimento pela CBCA.

1.3 JUSTIFICATIVA DA PESQUISA

As práticas de sustentabilidade na construção tornaram-se uma necessidade para todos os agentes da sociedade, sejam eles governos, consumidores, investidores, construtores e associações (FONSECA, 2010). Um empreendimento para ser sustentável deve atender, equilibradamente, os aspectos de viabilidade econômica, justiça social e aceitação cultural, como também de adequação

ambiental(FIEMG, 2008). A partir dessa perspectiva de sustentabilidade, é necessário que o setor da construção desenvolva e utilize materiais e tecnologias que tenham baixa quantidade de carbono associado, tendo em vista que a redução desses impactos é fundamental para mitigar as mudanças climáticas (HUANG et al., 2018).

Os materiais cimentícios suplementares (MCS) constituem um bom exemplo de prática sustentável, uma vez que essas adições normalmente são resíduos de outras indústrias e poderiam vir a ser descartados em grande quantidade e locais impróprios, acarretando riscos de contaminação dos solos e dos mananciais de água (DAL MOLIN, 1995). A utilização dos MCS reduz o teor de clínquer do cimento, reduzindo assim o impacto de emissões de CO_2 e gasto energético envolvido em seu processo de produção.

Dessa forma, a utilização das cinzas de bagaço de cana-de-açúcar (CBCA) em compostos cimentícios como substituição parcial ao cimento Portland apresenta duas contribuições do ponto de vista da sustentabilidade: reduz os impactos da disposição inadequada das cinzas do setor sucroalcooleiro e minimiza o consumo de clínquer e os respectivos impactos de sua cadeia produtiva.

1.4 RESTRIÇÕES E LIMITAÇÕES DA PESQUISA

O presente estudo limita-se a avaliar o desempenho de argamassas produzidas com cinzas de bagaço de cana-de-açúcar oriunda de apenas uma indústria de cachaça artesanal.

O estudo das propriedades mecânicas das argamassas limita-se aos ensaios de resistência à compressão axial e de resistência à tração por compressão diametral.

O estudo das propriedades físicas das argamassas limita-se ao ensaio de absorção de água por imersão.

2 REVISÃO TEÓRICA

2.1 CIMENTO PORTLAND

Cimento Portland é o nome formal para o material conhecido como cimento no setor da construção civil. Consiste em um pó fino com propriedades ligantes e que endurece e adquire resistência quando em contato com a água (FACHINI, 2010). Dessa forma, o cimento Portland é denominado um aglomerante hidráulico, ou seja, apresenta a propriedade de endurecer quando em reação com a água e após o endurecimento, os produtos da hidratação conferem resistência mecânica à mistura, denominada pasta (MEHTA; MONTEIRO, 2014).

Em função de seu baixo custo, excelentes propriedades mecânicas, facilidade de execução e adaptação aos mais variados projetos arquitetônicos, o cimento Portland consiste no material mais utilizado na construção civil (MEHTA; MONTEIRO, 2014).

2.1.1 Processo produtivo e composição química

Para o processo produtivo do cimento Portland são utilizados materiais carbonáticos, provenientes de calcário e gesso, bem como alumina (Al_2O_3) e sílica (SiO_2), facilmente extraídas de argilas e xistos. Os procedimentos de fabricação do cimento resumem-se à moagem da matéria-prima, mistura em proporções ideais e queima até a temperatura de 1450^{o}C. Sob essa temperatura, o material sofre uma fusão, formando pelotas que são denominadas clínquer (CORDEIRO, 2006). Em seguida, esse material é resfriado e fragmentado juntamente com pequenas proporções de gesso e materiais corretivos até uma granulometria bem fina, inferior a 75 μm, em moinho rotativo (NEVILLE, 1997). A introdução dos materiais corretivos, tais como areia, bauxita e minério de ferro, visa suprir o clínquer de elementos não existentes nas principais matérias-primas (CORDEIRO, 2006).

O clínquer é o principal material constituinte do cimento Portland, sendo composto de silicatos e aluminatos de cálcio (FELLICETTI, 2016). Segundo Mehta e Monteiro (2014), as reações para formação do cimento ocorrem conforme Equação 1 e Equação 2:

Pedra calcária + Argila + Calor = Clínquer (1)

Clínquer + Sulfato de Cálcio + Adições = Cimento Portland (2)

Ao final do processo de fabricação, o cimento Portland terá como principais compostos: silicato tricálcico (C_3S), silicato dicálcico (C_2S), aluminato tricálcico (C_3A) e ferroaluminatotetracálcico (C_4AF). Outros constituintes também podem se fazer presentes no cimento, como periclásio, sulfatos alcalinos e cal livre, mas ocorrem em menor proporção (CORDEIRO, 2006). A Tabela 1 apresenta os principais compostos do cimento Portland.

Tabela 1 - Composições do cimento Portland.

Nome do Composto	**Composições**	**Abreviação**
Silicato tricálcico	$3CaO.SiO_2$	C_3S
Silicato dicálcico	$2CaO.SiO_2$	C_2S
Aluminato tricálcico	$3CaO.Al_2O_3$	C_3A
Ferroaluminatotetracálcico	$4CaO.Al_2O_3.Fe_2O_3$	C_4AF

Fonte: CORDEIRO (Adaptado), 2006.

O silicato tricálcico (C_3S) e o silicato dicálcico (C_2S) são os principais componentes químicos do cimento, sendo os principais contribuintes para resistência mecânica da pasta. O aluminato tricálcico (C_3A) é o composto que contribui para a rápida hidratação e o ferroaluminatotetracálcico (C_4AF) embora não tenha relevante contribuição para a resistência mecânica de longo prazo da pasta, apresenta boa estabilidade química, o que contribui para a estabilidade da composição química do cimento(MEHTA; MONTEIRO, 2014).

2.1.2 Classificações do cimento Portland

Conforme a NBR 16697 (ABNT, 2018), cada tipo de cimento é especificado por um algarismo romano, podendo ser seguido ou não de letras, de acordo com sua composição e características especiais. Sua designação é dada por sua sigla, seguida de sua classe de resistência, podendo ser acrescido dos sufixos RS e BC, conforme a Tabela 2.

Tabela 2 - Designação normalizada, sigla e classe de cimento Portland.

Designação normalizada	**Subtipo**	**Sigla**	**Classe de resistência**	**Sufixo**
Cimento Portland Comum	Sem adição	CP I	25, 32 ou 40[c]	RS[a] ou BC[b]
	Com adição	CP I-S		
Cimento Portland Composto	Com escória granulada de alto forno	CP II-E		
	Com material carbonático	CP II-F		
	Com material pozolânico	CP II-Z		
Cimento Portland de alto-forno		CP III		
Cimento Portland pozolânico		CP IV		
Cimento Portland de alta resistência inicial		CP V	ARI[d]	
Cimento Portland Branco	Estrutural	CPB	25, 32 ou 40[c]	
	Não estrutural	CPB	---	---

a. Cimento Portland resistente a sulfatos: acrescenta-se a sigla RS à sigla e classe dos tipos originais de cimento.
b. Cimento Portland de baixo calor de hidratação: acrescenta-se a sigla BC à sigla e classe dos tipos originais de cimento.
c. As classes 25, 32 e 40 correspondem aos valores mínimos de resistência à compressão aos 28 dias de idade, em megapascals (MPa), conforme método de ensaio estabelecido pela ABNT NBR 7215.
d. CP V- ARI, Cimento Portland de Alta resistência Inicial, que após 1 dia de idade apresenta resistência igual ou superior a 14 MPa, conforme procedimentos da ABNT NBR 7215.

Fonte: NBR 16697, 2018.

Para melhor entendimento da composição dos diferentes tipos de cimento, a NBR 16697 (ABNT, 2018) apresenta algumas definições relevantes:

- Clínquer Portland: produto intermediário do processo de fabricação do cimento Portland. Constitui-se em grande parte de silicatos de cálcio com propriedades hidráulicas e que podem ser obtidos após a queima sob elevadas temperaturas de misturas moídas e convenientemente dosadas de materiais calcários e argilosos.

- Cimento Portland: ligante hidráulico obtido por meio da moagem do clínquer Portland com o incremento, durante o processo de fabricação, de uma ou mais formas de sulfatos de cálcio e adições minerais nas devidas proporções.

- Escória granulada de alto-forno: subproduto da fabricação do gusa, obtido por resfriamento brusco durante o tratamento do minério de ferro em alto-forno. Constitui-se principalmente de silicatos e alumino-silicatos de cálcio.

- Materiais pozolânicos: materiais silicosos ou silicoaluminosos que finamente fragmentados e na presença de água, reagem com o hidróxido de cálcio sob temperatura ambiente, formando compostos com propriedades cimentícias.

- Materiais carbonáticos: material finamente dividido rico em carbonato de cálcio.

- Cimento Portland de alto-forno: cimento composto pelo clínquer Portland com a adição de escória granulada de alto-forno, sendo que esses dois materiais são misturados de forma homogênea, bem como moídos conjunta ou separadamente. Esse tipo de cimento pode conter uma ou mais formas de sulfato de cálcio e materiais carbonáticos.

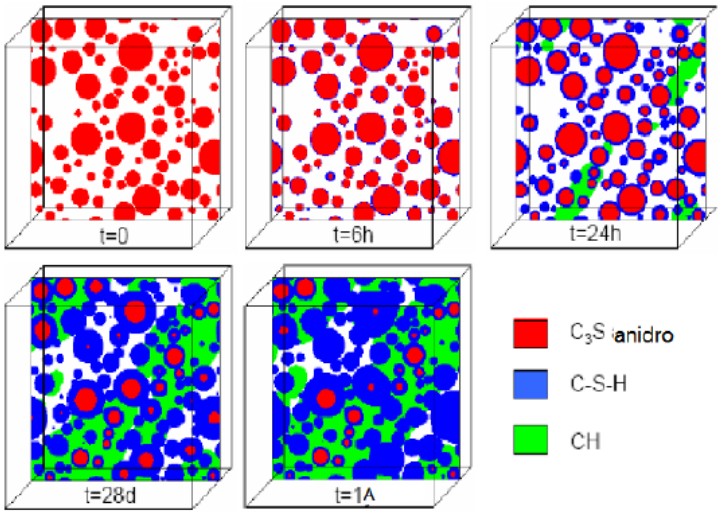
- Cimento Portland pozolânico: obtido pela mistura homogênea do clínquer Portland com materiais pozolânicos, moídos em conjunto ou separadamente. Pode conter uma ou mais formas de sulfato de cálcio e materiais carbonáticos.

2.1.3 Hidratação do cimento

O processo de hidratação se inicia com a mistura do cimento com certa quantidade de água, obtendo-se a pasta, que por sua vez inicialmente perde plasticidade com o decorrer do tempo, até enrijecer por completo. O intervalo de tempo decorrido entre a adição de água até o início das reações dos constituintes do cimento denomina-se “tempo de início de pega”. Os momentos iniciais dessas reações são marcados por um aumento brusco da viscosidade e pela elevação da temperatura. O “tempo de fim de pega” é atingido quando a pasta se torna indeformável para pequenas cargas e passa a ser um bloco rígido (PAULA, 2006).

Os silicatos de cálcio (C_2S e C_3S), correspondentes a 75% da composição do cimento, reagem com a água dando origem aos silicatos de cálcio hidratados (C-S-H) e aos hidróxidos de cálcio (CH), este último responsável pelo pH alcalino da pasta de cimento (PAULA, 2006). Os principais compostos químicos participantes do processo de hidratação estão apresentados na Figura 1:

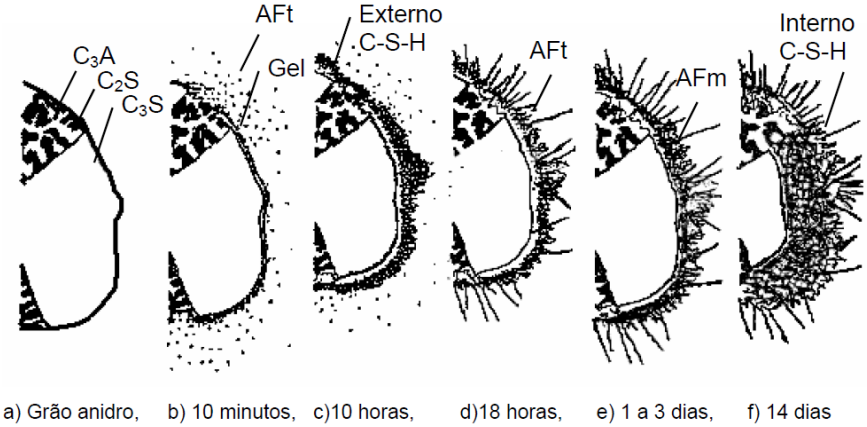
Figura 1 - Processo de hidratação ao longo do tempo.



Fonte: FELICETTI (2016).

O processo de hidratação ocorre com a liberação de calor na forma de energia, ou seja, com a ocorrência de reações exotérmicas (FELLICETTI, 2016). O desenvolvimento estrutural da microestrutura do cimento Portland com o decorrer do tempo é apresentado na Figura 2.

Figura 2 - Diagrama esquemático do desenvolvimento estrutural no decorrer da hidratação do cimento Portland.



Fonte: FREITAS (2001).

Freitas (2001) apresentou a descrição de cada fase correspondente à evolução da hidratação apresentada na Figura 2.

a) Seção de um grão anidro de cimento Portland em contato inicial com a água;
b) O grão inicia o processo de reação e a concentração de íons na solução se eleva. No início da hidratação são formadas lâminas de C-S-H na

superfície do C_3S, bem como um gel amorfo rico em aluminatos na superfície do C_3A, local em que ocorrem a nucleação de pequenas agulhas de AFt (fase de formação da etringita). Pequenos bastões de etringita são formados após o decorrer de uma hora de hidratação. A etringita corresponde ao composto sulfoaluminato de cálcio hidratado e sua formulação é dada por $Ca_6Al_2(SO_4)_3(OH)12.26H2O$.

c) Intervalo de aceleração, momento em que acontece um rápido crescimento do C-S-H e do CH. Essa fase apresenta a reação do C_3S para a formação do C-S-H externo sobre a malha de AFt, deixando 1 μm entre a superfície do grão e a “casca” hidratada. O C-S-H possui forma laminar e o CH precipita-se nos poros saturados em formas de placas hexagonais.
d) Crescimento secundário da AFt. Nessa etapa, o C-S-H começa a se formar no interior da carapaça hidratada devido à continuidade da hidratação do C_3S.
e) Formação de discos hexagonais de Afm (fase de formação de monossulfato) resultante da hidratação do C_3A com o Aft. A continuação formação de produtos internos reduz a separação entre a concha hidratada e os grãos anidros.
f) É formado o C-S-H suficiente para ocupar o espaço entre os grãos e a carapaça. Essas duas últimas etapas (“e” e “f”) apresentam a evolução da hidratação nas idades mais avançadas, período em que os poros estão significativamente reduzidos.

2.2 ADIÇÕES MINERAIS

2.2.1 Definição

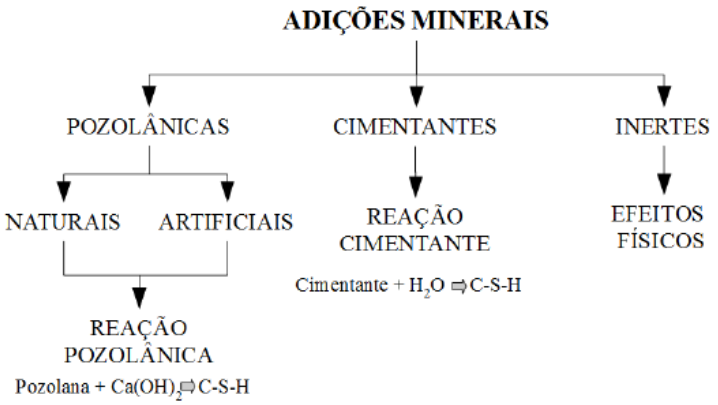
As adições minerais são materiais utilizados em conjunto com o cimento Portland a fim de se proporcionar melhorias no desempenho tecnológico de produtos à base de cimento. As adições geralmente são obtidas a partir de resíduos ou subprodutos industriais ou agroindustriais e sua utilização no cimento pode acarretar redução de custos de produção, tendo em vista que substituem parcialmente o volume de clínquer, um material energeticamente mais nobre. O uso de adições minerais pode contribuir para a redução dos impactos ambientais, levando-se em

conta o reaproveitamento de resíduos, a preservação de jazidas de calcário e argila (matérias-primas do cimento) e a redução do volume de CO_2 e outros gases estufa (CO, CH_4, NO_X, NO_2 e SO_2) emitidos durante a fabricação do cimento Portland(CORDEIRO, 2006).

2.2.2 Tipos de adições minerais

As adições minerais são materiais silicosos finamente divididos que apresentam propriedades pozolânicas, cimentantes ou de preenchimento de poros, este último também denominado efeito filler ou efeito físico. Podem ser utilizadas como substituição parcial ao cimento ou como incremento ao concreto (MEHTA e MONTEIRO, 2008). Portanto, as adições podem ser classificadas conforme sua ação físico-química no concreto (Figura 3), enquadrando-se em três distintas categorias: material inerte, pozolânico e cimentante(FELLICETTI, 2016).

Figura 3 - Tipos de adições minerais.



Fonte: Felicetti, 2016.

2.2.2.1 Fíler

Fíler como uma adição mineral finamente dividida que não apresenta atividade química, isto é, mineral inerte cuja ação consiste no efeito físico de empacotamento granulométrico, além dos efeitos de diluição e de geração de pontos de nucleação para a hidratação dos grãos de cimento(BERODIER; SCRIVENER, 2014; DAL MOLIN, 1995; SCRIVENER et al., 2015).

Inicialmente, a introdução de um material cimentício suplementar (MCS) gera o efeito de diluição, uma vez que o MCS irá substituir parcialmente o clínquer do cimento. Dessa forma, haverá mais espaço para a formação do clínquer hidratado e, logo, o grau de reação do componente clínquer será mais elevado nos compostos com o MCS do que nos materiais com a matriz puramente cimentícia (SCRIVENER et al., 2015).

Ainda segundo Dal Molin (1995), os efeitos físicos provenientes da adição de fíler dividem-se em três tipos:

A) Efeito microfíler: as partículas das adições, cujo diâmetro médio deve ser menor ou semelhante que o diâmetro médio das partículas do cimento, preenchem vazios da mistura, aumentando sua densidade;

B) Refinamento das estruturas de poros e dos produtos de hidratação do cimento: gerado pelas pequenas partículas das adições, que por sua vez podem agir como pontos de nucleação para os produtos da hidratação. Segundo Berodier e Scrivener (2014), as superfícies do material adicionado podem funcionar como pontos de nucleação para a ocorrência da hidratação do clínquer e esse efeito será mais acelerado para materiais mais finos, como é o caso da sílica ativa.

C) Alteração da microestrutura da zona de transição: a incorporação de adições finas no concreto altera a movimentação das partículas de água da mistura, eliminando ou diminuindo o acúmulo de água livre que normalmente fica retido nos agregados.

Na concepção de Soares (2010), fíler ou adição com efeito fíler consiste em um material com diâmetro médio aproximado ao diâmetro do cimento Portland, que por meio do efeito físico melhora algumas propriedades do concreto, quando incorporado em teores inferiores a 15% em relação à massa do cimento.

Geralmente os filers são inertes, porém podem manifestar atividade hidráulica ou participar de reações com alguns constituintes do clínquer, como o C_3A (aluminatotricálcico) e o C_4AF (ferroaluminatotetracálcico), o que justifica sua utilização como adição ao cimento (SOARES, 2010).

2.2.2.2 Adição cimentante

O material cimentante é aquele que não requer do hidróxido de cálcio, presente no cimento Portland, para a formação de produtos cimentantes. Entretanto, sua auto hidratação ocorre lentamente e a quantidade de produtos cimentantes formada não é suficiente para o uso desse material em fins estruturais. Dessa forma, as adições cimentantes são utilizadas como adição ou substituição ao cimento Portland a fim de acelerar o processo de hidratação. A escória granulada de alto-forno é um exemplo desse tipo de adição (SOARES, 2010).

2.2.2.3 Adição pozolânica

Materiais pozolânicos ou pozolanas são aqueles materiais silicosos ou silicoaluminosos, que por si só apresentam nenhuma ou reduzida propriedade ligante. Porém, se finamente reduzidos e em contato com água, estes materiais reagem com hidróxido de cálcio à temperatura ambiente e formam compostos com propriedades aglomerantes (NBR 12653, ABNT 2015).

As adições pozolânicas ao cimento Portland contribuem para a melhoria de algumas propriedades de argamassas e concretos, como: redução do calor de hidratação, maior durabilidade, em função da inibição da reação álcali-agregado, refinamento dos poros da pasta hidratada e maior resistência ao ataque de ácidos (FERREIRA *et al*., 2016; SANTOS, 2006). Essas melhorias decorrem da estabilização do hidróxido de cálcio formado durante a hidratação do clínquer Portland e da formação do C-S-H com menor razão CaO/SiO_2 de menor basicidade (FERREIRA *et al*., 2016; SANTOS, 2006).

Segundo Felicetti *et al*. (2014), a eficácia da introdução das pozolanas é limitada até determinados percentuais de substituição aos materiais cimentícios, tendo em vista que o seu efeito químico depende da disponibilidade de hidróxido de cálcio liberado durante a hidratação do cimento.

2.2.3 Classificação das pozolanas

Há diferentes requisitos para a classificação dos materiais pozolânicos. Segundo a NBR 12653 (ABNT, 2015), as pozolanas podem ser enquadradas em naturais ou artificiais, conforme sua origem:

- Naturais

Materiais de origem vulcânica, comumente de caráter petrográfico ácido (com teor de SiO_2 superior a 65%) ou de origem sedimentar, que apresenta atividade pozolânica.

- Artificiais

Subprodutos industriais ou materiais resultantes de tratamento térmico, com atividade pozolânica.

Ademais, conforme as especificações da NBR 12653 (ABNT, 2015), de maneira geral, as pozolanas podem ser classificadas em três classes:

- Classe N

Pozolanas naturais ou artificiais tais como materiais vulcânicos de caráter petrográfico ácido, “cherts” silicosos, terras diatomáceas e argilas calcinadas.

- Classe C

Cinzas volantes resultantes da queima do carvão mineral em usinas termoelétricas.

- Classe E

Demais pozolanas cujas características não se enquadram às classes N e C.

A NBR 12653 (ABNT, 2015) também dispõe dos requisitos químicos e físicos necessários para que um material possa ser considerado pozolânico, conforme Tabela 3 e Tabela 4

Tabela 3 - Requisitos químicos para material pozolânico.

Propriedades	**Classe de material pozolânico**		
	N	C	E
$SiO_2 + Al_2O_3 + Fe_2O_3$ (% mínima)	≥ 70	≥ 70	≥ 50
SO_3 (% máxima)	≤ 4	≤ 5	≤ 5
Teor de umidade (% máxima)	≤ 3	≤ 3	≤ 3
Perda ao fogo (% máxima)	≤ 10	≤ 6	≤ 6
Álcalis disponíveis em Na_2O (% máxima)	≤ 1,5	≤ 1,5	≤1,5

Fonte: NBR 12653 (ABNT, 2015).

Tabela 4 - Requisitos químicos para material pozolânico.

Propriedades	**Classe de material pozolânico**		
	N	C	E
Material retido na peneira 45	< 20%	< 20%	< 20%
Índice de desempenho com cimento Portland aos 28 dias em relação ao controle	≥ 90%	≥ 90%	≥ 90%

Atividade pozolânica com cal aos 7 dias	≥ 6MPa	≥ 6MPa	≥ 6MPa

Fonte: NBR 12653 (ABNT, 2015).

2.2.4 Reação pozolânica

A atividade pozolânica pode ser definida como todas as reações que envolvem os constituintes ativos das pozolanas, água e hidróxido de cálcio (MASSAZA, 1998). Felicetti (2016) apresenta a reação pozolânica simplificadamente por meio da Equação 3:

$$\text{Pozolanas} + CH + H \rightarrow C\text{-}S\text{-}H \qquad (3)$$

Onde:

CH – hidróxido de cálcio;

H – H_20 – água;

C-S-H – silicato de cálcio hidratado.

O efeito químico das adições pozolânicas está vinculado com a capacidade da pozolana em reagir com hidróxido de cálcio (CH), formado durante a hidratação do Cimento Portland, para formar o silicato de cálcio hidratado (C-S-H), que por sua vez é o principal produto que confere resistência às pastas de cimento hidratadas (BATISTA, 2016).Dessa forma, as reações pozolânicas dependem diretamente da natureza da pozolana, mais especificamente da qualidade e quantidade de suas fases ativas (amorfas) constituintes, que irão reagir com o hidróxido de cálcio, bem como da quantidade máxima de hidróxido de cálcio que poderá reagir com a pozolana (MASSAZA, 1998). As principais fases ativas presentes nas pozolanas são a sílica (SiO_2) e alumina (Al_2O_3) amorfas (CORDEIRO, 2006).

Segundo Cordeiro (2006), a combinação entre a pozolana e o hidróxido de cálcio, na presença de água, depende dos seguintes fatores:

- Conteúdo de pozolana na mistura;
- Natureza das fases ativas da pozolana;
- Teor de sílica ativa na pozolana;
- Razão de hidróxido de cálcio / pozolana na mistura.

As reações pozolânicas ocorrem lentamente, o que retarda as taxas de liberação de calor e o desenvolvimento da resistência mecânica do composto (MEHTA e MONTEIRO, 2008). Conforme Cordeiro (2006), a taxa de reação depende dos seguintes parâmetros:

- Área superficial da pozolana;
- Temperatura;
- Relação sólido-água da mistura.

As pozolanas também oferecem melhorias para concretos e argamassas por meio do efeito fíler, proveniente da capacidade das partículas destes materiais, geralmente micrométricos, de se alojarem nos interstícios existentes entre as partículas de cimento e na interface agregado-pasta (CORDEIRO; DÉSIR, 2010). Dessa forma, as pozolanas oferecem benefícios aos materiais cimentícios não apenas em função do efeito químico, como também em função do efeito físico. As reações pozolânicas ocorrem e, a partir de um determinado período, a sílica para de reagir significativamente com os produtos de hidratação do cimento, passando a atuar como um fíler inerte e contribuindo para a redução da porosidade e aumento da densidade do material cimentício (MORAES NETO, 2013; TIBONI, 2007).

2.2.5 Métodos para avaliação da atividade pozolânica

2.2.5.1 Método Condutividade Elétrica – Luxán *et al* (1989)

O método proposto por Luxán *et al* (1989) afere a pozolanicidade do material através de medidas da condutividade elétrica de 5 gramas da amostra em 200 ml de solução saturada de hidróxido de cálcio (cal hidratada) sob condições controladas. Os resultados da variação da condutividade são comparados com valores tabelados, o que permite a determinação da pozolanicidade da amostra. Quanto maior a condutividade final da solução, mais pozolânico será o material, pois menor será a quantidade de íons Ca^{2+}e $(OH)^{-}$ disponíveis na solução(BATISTA, 2016; DE PADUA, 2012).

2.2.5.2 Método Chapelle Modificado

Proposto por J. Chapelle em 1958 e modificado por Raverdy em 1980, o método Chapelle Modificado é viável devido a sua rapidez e simplicidade de

execução. A reatividade do material é aferida de acordo com sua capacidade de fixar hidróxido de cálcio quando em solução aquosa de CaO. Os procedimentos desse ensaio são realizados em conformidade com a NBR 15985 (ABNT, 2010) e os resultados apresentam a quantidade em miligramas de hidróxido de cálcio fixada por grama de material pozolânico.Materiais considerados pozolânicos devem obter uma fixação de hidróxido de cálcio mínima de330 mg/g e quanto maior essa fixação maior será o seu caráter pozolânico (BATISTA, 2016).

2.2.5.3 Índice de Atividade Pozolânica (IAP) por Desempenho Mecânico

O método de determinação do Índice de Desempenho é baseado na NBR 5752 (ABNT, 2014). Conforme a referida Norma, os procedimentos desse método consistem na realização de ensaios mecânicos de compressão de argamassas confeccionadas apenas com cimento Portland CP II-F 32 e argamassas produzidas com 25% de substituição, em massa, do cimento pelo material cuja pozolanicidade será avaliada. As amostras devem ser submetidas ao ensaio de compressão aos 28 dias de idade. Por fim, o método de determinação do índice de desempenho apresenta como resultado um valor percentual de pozolanicidade em relação à argamassa de referência e quanto maior for esse percentual, maior será o Índice de AtividadePozolânica (IAP) do material em estudo.

2.3 ATIVIDADE SUCROALCOOLEIRA

2.3.1 Cana-de-açúcar

O plantio da cana-de-açúcar é uma cultura praticada no mundo há mais de 2000 anos, originária na África e Ásia. Essa cultura foi implantada na América com a chegada dos europeus e rapidamente se tornou a principal prática econômica dos países desse continente, com destaque para o Brasil (ROLPH, 1917). Segundo Batista (2016), a cana chegou ao Brasil em 1532 e a produção açucareira consistiu na primeira atividade econômica do país.

Segundo Tommaselli *et al*. (2011), a cultura da cana-de-açúcar registrou um grande crescimento no país a partir da década de 1970, quando surgiu o Proálcool, Programa Nacional do Álcool, que por sua vez incentivou a produção e uso do etanol como uma alternativa de combustível automotivo, alternativa menos poluente se comparada aos combustíveis fósseis.

Atualmente, o Brasil é o maior produtor de cana-de-açúcar do mundo, com o processamento de aproximadamente 641 milhões de toneladas na safra de 2017/2018, sendo que a região Centro-Sul (estados das regiões Sul, Sudeste e Centro-Oeste) respondem por 93% desse volume(UNICA, 2019).

2.3.2 Produção de álcool e açúcar

O Brasil é o maior produtor e exportador de açúcar do mundo, registrando a produção de 38,6 milhões e exportação de 27,8 milhões de toneladas de açúcar no ciclo 2017/2018, o que representa 20% da produção mundial e 45% da exportação global. Com relação ao mercado do etanol, o país é o segundo maior produtor e exportador global, sendo que no ciclo de 2017/2018 o volume de etanol produzido chegou a 27,9 bilhões de litros (UNICA, 2019).

O processo de produção de açúcar e álcool engloba os procedimentos de colheita da cana, transporte até a usina, lavagem e processamento. A diferenciação da produção se dá na etapa de extração do caldo de cana, que por sua vez será tratado para a fabricação do açúcar e/ou fermentado para a fabricação do etanol (MOREIRA; GOLDEMBERG, 1999). As fases de cada cadeia de produção estão dispostas na Tabela 5.

Tabela 5 - Etapas da produção de Açúcar e Etanol.

Produção de Açúcar	**Produção de Etanol**
1. Lavagem da cana;	
2. Preparo para moagem ou difusão;	
3. Extração do caldo, moagem ou difusão;	
4. Purificação do caldo;	4. Tratamento do caldo para produção do álcool;
5. Evaporação do caldo;	5. Fermentação do caldo;
6. Cozimento;	6. Destilação do vinho;
7. Cristalização da sacarose;	7. Retificação;
8. Centrifugação: separação entre cristais e massa cozida;	8. Desidratação: álcool anidro ou hidratado.
9. Secagem e estocagem do açúcar.	-

Fonte: Batista (2016).

2.3.3 Produção da Cachaça

Segundo a Instrução Normativa nº13, do ano 2005, do Ministério de Agricultura, Pecuária e Abastecimento (MAPA) do Brasil, a cachaça é a denominação da Aguardente de Cana com um teor alcoólico de 38% a 48% (em volume) sob a temperatura de 20ºC, obtida a partir da destilação do mosto fermentado do caldo da cana, sendo permitida a adição de açúcares em até 6 g/L expressos em sacarose.

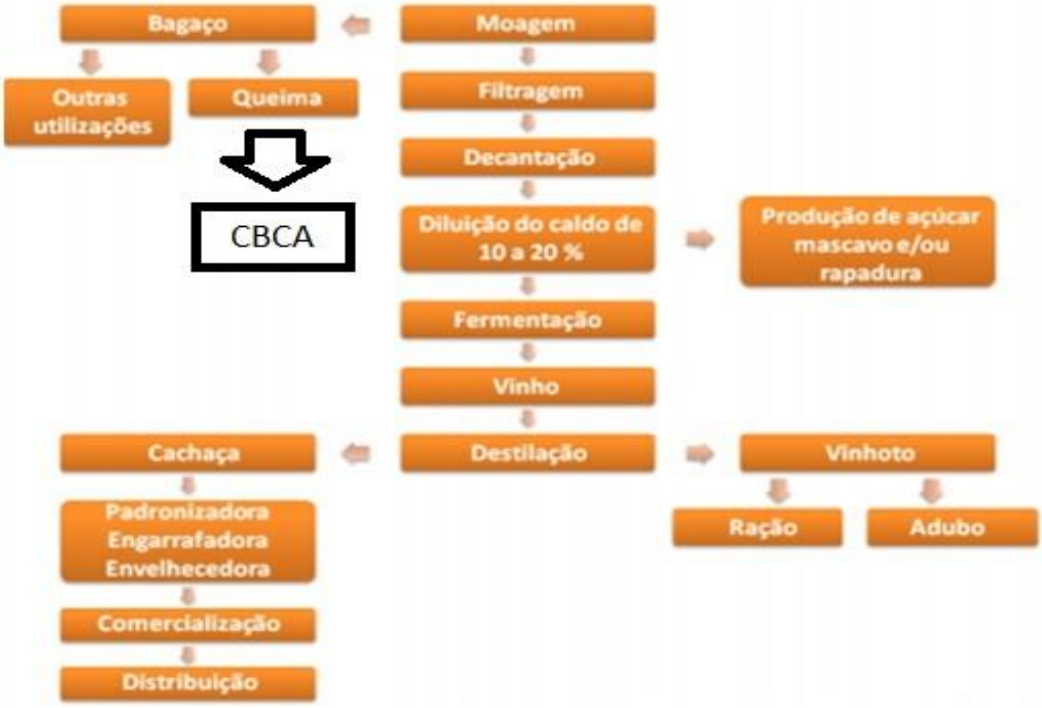
Estima-se que o Brasil possui instalações com capacidade para produzir 1,2 bilhão de litros de cachaça por ano, entretanto, a produção anual é inferior a 800 milhões de litros. O censo do IBGE de 2016 indicou a existência de 11.024 estabelecimentos produtores no território brasileiro (IBRAC, 2021).

Entretanto, de acordo com o Anuário da Cachaça de 2020, publicado pelo MAPA, existem 1086 produtores de aguardente e cachaça no país, sendo 894 produtores de cachaça, 357 de aguardente e 165 de aguardente e cachaça (IBRAC, 2021). O contraste entre os números do IBGE e do Anuário indicam a grande quantidade de produtores não registrados.

Com relação à exportação, no ano de 2019, a venda da cachaça para o exterior gerou uma receita de US$ 14,60 milhões (correspondente a 7,33 milhões de litros), sendo que a bebida foi exportada para 70 países, por mais de 50 empresas (IBRAC, 2021).

O processo de produção da cachaça está resumido no fluxograma da Figura 4.

Figura 4 - Fluxograma de produção da cachaça brasileira.



Fonte: AGEITEC (adaptado) (2021).

Inicialmente ocorre a colheita da cana, seguida da moagem, na qual ocorre a extração do caldo. A segunda etapa do processo é a filtragem do caldo e a terceira etapa consiste na decantação, etapa em que o caldo é levado para a dorna de decantação para a separação de suas impurezas (AGEITEC, 2021).

Na quarta etapa ocorre a diluição até que o caldo de cana atinja o teor de sacarose desejado. Ainda nessa etapa, o produtor pode adicionar o ácido sulfúrico, a fim de evitar a contaminação de bactérias indesejáveis que ao final do processo poderiam produzir compostos prejudiciais à qualidade da cachaça (AGEITEC, 2021).

Em seguida, o caldo é submetido ao processo de fermentação, processo no qual as leveduras *Saccharomycescerevisae* são utilizadas. Esse procedimento deve ser concluído, em média, em 24 horas. O surgimento de borbulhas e do cheiro indica a finalização dessa etapa (AGEITEC, 2021).

O produto da fermentação será o vinho, que por sua vez será submetido à destilação em alambique. Nessa etapa, a parte inicial e final do álcool não é aproveitada, mas sim sua parte intermediária (AGEITEC, 2021), sendo que as partes inicial e final são denominadas cabeça e cauda, respectivamente, e a parte aproveitada é conhecida como coração(CARDOSO, 2013). Em seguida, a bebida

passa pelo processo de padronização, de forma a se equilibrar o teor alcoólico, e pode ser engarrafada ou envelhecida em tonéis, a fim de se obter aroma e sabor mais agradáveis. Finalmente, a cachaça já estará pronta para ser comercializada (AGEITEC, 2021).

2.3.4 Subprodutos

Os principais produtos gerados pela indústria sucroalcooleira são: folhas e pontas, água de lavagem, bagaço, torta de filtro, leveduras e vinhaça. A água utilizada na lavagem da cana anteriormente à moagem pode ser reutilizada na fertirrigação e para a geração de biogás. O bagaço pode ser aproveitado para a produção de energia, combustível, rações por hidrólise, polpa de papel, celulose e aglomerados. As folhas e pontas podem ser aproveitadas para os mesmos fins que o bagaço, como também para forragem. A torta de filtro e as leveduras são utilizadas na adubação. A vinhaça é usada como fertilizante para os canaviais (CORDEIRO, 2006).

O bagaço da cana pode ser aproveitado para a alimentação de animais em confinamento e produção de celulose (FELLICETTI, 2016), porém é mais proveitoso reutilizar esse resíduo para a geração de energia.

O bagaço apresenta um poder calorífico inferior (PCI) médio de 7,74 MJ/kg (1850 kcal/kg), sob uma umidade de 50%. Vale ressaltar que o PCI corresponde ao calor liberado pela combustão de determinado material até que toda a água resultante esteja no estado gasoso. Esse valor favorável de PCI associado ao grande volume desse resíduo gerado pelo setor sucroalcooleiro torna a sua reutilização para a cogeração de energia, processo de reaproveitamento de energia térmica em forma de vapor para a geração de energia elétrica, uma atividade atrativa (COELHO, 1999). A colheita da cana coincide com o período de baixa da produção hidroelétrica do Brasil, o que favorece ainda mais o uso do bagaço para geração energética (UNICA, 2019).

Dessa forma, o bagaço da cana é tido hoje como um subproduto valioso do setor sucroalcooleiro, podendo ser reutilizado como combustível dentro da própria usina canavieira e seu excedente pode ser facilmente comercializado.

Com relação ao aspecto ambiental, a queima do bagaço para geração de energia emite relevante quantidade de CO_2 na atmosfera. Entretanto, o balanço de

emissões de carbono é praticamente nulo quando toda a cadeia de produção sucroalcooleira é levada em conta, tendo em vista que o CO_2 liberado na queima será novamente capturado por meio da fotossíntese no ciclo subsequente da cultura da cana-de-açúcar (TOMMASELLI et al., 2011).

2.4 CBCA (CINZA DO BAGAÇO DE CANA-DE-AÇÚCAR)

2.4.1 Volume de Produção e Impactos

A queima do bagaço produz como resíduo as cinzas do bagaço da cana-de-açúcar (CBCA). Cada tonelada de cana explorada origina 250 kg de bagaço, que por sua vez, ao ser queimado gera cerca de 6 kg de cinzas (FIESP, 2001). Levando-se em conta que cerca de 90% do bagaço gerado é utilizado como combustível nas caldeiras, pode-se estimar que no Brasil somente na safra 2017/2018 foram geradas em torno de 3,4 milhões de toneladas de CBCA (MAUÉS, 2007; UNICA, 2019).

A CBCA comumente é utilizada para a adubação dos próprios canaviais da usina produtora, entretanto, essa prática pode acarretar a contaminação do solo, das águas superficiais e dos lençóis freáticos, devido à presença de alguns metais pesados na composição das cinzas (TOMMASELLI et al., 2011). As cinzas também podem ser aproveitadas para a ração de animais. Contudo, grande parte da CBCA ainda não é reutilizada e por vezes é estocada ou descartada de maneira inadequada, o que pode provocar graves danos socioambientais, como a contaminação do solo e dos cursos d´água e problemas respiratórios para a população local, além de desperdiçar uma matéria-prima de qualidade que poderia ser reutilizada em outras atividades (FRÍAS; VILLAR; SAVASTANO, 2011; POGGIALI, 2010).

2.4.2 Características

Com relação ao percentual de óxidos, a CBCA apresenta grande quantidade de dióxido de silício (SiO_2), composto também denominado de sílica. Esse percentual geralmente é superior a 60% (em massa). Outro fator que contribui para o alto teor de sílica das cinzas provém da areia das lavouras, que nem sempre é totalmente removida durante os procedimentos de lavagem e processamento da cana-de-açúcar (CORDEIRO, 2006), entretanto, essa areia é rica em quartzo, forma

cristalina da sílica e que torna a CBCA menos reativa e consequentemente, reduz a sua pozolanicidade (FREITAS, 2005).

De acordo com Paula (2006), as propriedades da CBCA irão variar de acordo com as condições de queima das cinzas. Portanto, a composição química da CBCA depende não apenas das características do bagaço, como também da temperatura e do período de queima.

O teor de umidade do bagaço que é queimado nas caldeiras influencia diretamente no rendimento da combustão, como também nas características da cinza formada. O bagaço com um teor de umidade de 50% apresenta uma temperatura de ignição entre 500°C e 600°C, já o bagaço com o teor de umidade entre 35% e 40% apresenta temperatura de ignição em torno de 300°C e 400°C (CORDEIRO, 2006; COELHO, 1999). A Tabela 6 apresenta as principais modificações ocorridas no bagaço da cana em função da faixa de temperatura de queima.

Tabela 6 - Modificações do bagaço em função da temperatura.

Temperatura de queima do bagaço	**Modificações no bagaço**
<100°C	Perda de massa em função da evaporação da água
350 °C	Ignição do material mais volátil e início da queima do bagaço
400°C a 500°C	Perda substancial de massa e oxidação do carbono residual. A cinza torna-se rica em sílica amorfa.
>700°C	Possibilidade de formação do quartzo e outras formas cristalinas.
>800°C	Formação de sílica essencialmente cristalina.

Fonte: adaptado de PAULA (2006).

O percentual de carbono das cinzas deve ser minimizado, uma que vez que altos teores de carbono representam menores teores de sílica e logo, podem prejudicar a resistência mecânica dos materiais à base de cimento aos quais a CBCA será introduzida. A adição de cinzas com alto teor de carbono pode alterar o tempo de pega desses materiais (COOK, 1986). Dessa forma, é desejável que a temperatura de queima seja superior a 500°C a fim de se eliminar da CBCA grande parte desse carbono residual.

Para temperaturas de queima superiores a 700°C, haverá a formação da sílica cristalina (PAULA, 2006), sendo que para queima de cinzas de bagaço em temperaturas acima de 800°C evidenciaram a formação de sílica de alta cristalinidade com picos de quartzo e mulita, conforme verificado por Payá *et al.* (2001).

A presença de sílica amorfa é característica de cinzas com alta reatividade e com propriedades desejáveis para a incorporação em materiais à base de cimento (BATISTA, 2016). Dessa forma, a faixa de temperatura mais adequada para a queima das cinzas que será incorporada a materiais cimentícios está entre 500°C e 700°C. Segundo Cordeiro *et al.* (2009), a temperatura de 600°C é a ideal para a formação de uma CBCA predominantemente pozolânica.

A Tabela 7 apresenta o percentual de sílica de diferentes cinzas utilizadas por alguns autores.

Tabela 7 - Teor de sílica da CBCA, por diversos autores.

Autor	**País**	**Região de coleta**	**SiO_2 (%)**
Santos, Formagini(2008)	Brasil	Sindrolândia, MS	83,80
Paula et al.(2009)	Brasil	Uracânia, MG	83,70
Batista (2016)	Brasil	Bambuí. MG	55,23
Cordeiro (2006)	Brasil	São João da Barra, RJ	78,34
Freitas (2005)	Brasil	Campos dos Goytacazes, RJ	65,70
Paya et al. (2002)	Colômbia	Valle delCauca	59,87
Martinera-Hernandez et al. (1998)	Cuba	Villa Clara	72,74
Ganesan et al. (2007)	Índia	Aranthangi, TamilNadu	64,15
Mu´Azu (2007)	Nigéria	---	57,95
Amin (2010)	Paquistão	---	87,40

Fonte: O autor (2020).

2.4.3 Cachaça Decisão

Localizada em Sabinópolis, Minas Gerais, a Decisão, empresa produtora de cachaça, foi a fornecedora das amostras de CBCA para a presente pesquisa. A fabricante produz e comercializa aproximadamente 40.000 litros de cachaça por ano. A Decisão se destaca no mercado com a venda de suas duas marcas, a cachaça Decisão e a cachaça Sabicana (Figura 5).

Figura 5 - Cachaças Decisão (versão prata) e Sabicana(versão ouro).

Fonte: Setor de vendas da Decisão, 2020.

Ambas as marcas já receberam várias premiações, conforme Tabela 8:

Tabela 8 - Premiações da cachaçaria Decisão

Cachaça	Exposição	Categoria	Colocação
Sabicana	24ª Exposição ExpoCachaça (2014) 4ª Classificação Anual de Cachaças	Envelhecida Carvalho	Bronze
Sabicana	26ª Exposição ExpoCachaça (2016) 5ª Classificação Anual de Cachaças	Premium	Prata
Sabicana	26ª Exposição ExpoCachaça (2016) 5ª Classificação Anual de Cachaças	Carvalho	Prata
Sabicana	26ª Exposição ExpoCachaça (2016) 5ª Classificação Anual de Cachaças	Madeiras Brasileiras	Prata
Decisão	26ª Exposição ExpoCachaça (2016) 5ª Classificação Anual de Cachaças	Brancas Puras	Bronze
Decisão	26ª Exposição ExpoCachaça (2016) 5ª Classificação Anual de Cachaças	Madeiras Brasileiras	Prata
Decisão	9º Concurso Anual e Nacional da Cachaça (2020)	Blends de Madeira	Ouro

Sabicana	9º Concurso Anual e Nacional da Cachaça (2020)	Madeiras Estrangeiras	Prata

Fonte: Autor, 2020.

2.5 INCORPORAÇÃO DA CBCA EM MATERIAIS CIMENTÍCIOS

Os próximos tópicos tratam da influência da incorporação da CBCA em materiais cimentícios, bem como do processamento das cinzas necessário para a sua reutilização, segundo pesquisas de alguns autores.

2.5.1 Processamento da CBCA

Para o uso das cinzas de bagaço de cana como substituição parcial ao cimento em materiais cimentícios é de fundamental importância que a CBCA seja submetida aos procedimentos de moagem e requeima. As condições de queima devem ser bem controladas, a fim de se reduzir o teor de carbono e permitir uma melhor interação entre as fases amorfas e cristalinas das cinzas. Já a moagem possibilita um aumento da superfície específica e maior homogeneidade da amostra (CORDEIRO; ANDREÃO; TAVARES, 2019; CORDEIRO; KURTIS, 2017).

Para incorporação da CBCA em argamassa, Bezerra *et al.* (2017) promoveram a requeima de das cinzas a uma temperatura de 600ºC, durante três horas e sob taxa de aquecimento de 10ºC por minuto, bem como moagem em moinho de bolas de alto desempenho durante 10 minutos, a 300 rpm, até se obter granulometria inferior a 0,045 mm.

Batista (2016) submeteu as cinzas do bagaço à queima sob temperatura de 650ºC por três horas, bem como moagem em moinho de bolas cerâmicas durante 60 minutos. As amostras processadas foram utilizadas em concretos e argamassas.

Ganesan, Rajagopal e Thangavel (2007) utilizaram a CBCA em concretos e argamassas e para isso, as cinzas foram recalcinadas a uma temperatura de 650ºC durante uma hora. As cinzas foram também moídas até se obter um diâmetro médio de 5,4 µm (GANESAN; RAJAGOPAL; THANGAVEL, 2007).

Para incorporação da CBCA em argamassas, Ribeiro e Morelli (2014) promoveram a requeima de três amostras de cinzas a 3 distintas temperaturas, 500ºC, 600ºC e 700ºC, sob uma taxa de aquecimento de 10ºC por minuto e durante um período de seis horas. Os autores avaliaram a pozolanicidade das amostras

conforme a norma europeia NP EN 196-5 e todas as amostras foram classificadas como materiais pozolânicos. Com base nos resultados dos ensaios mecânicos das argamassas, os autores identificaram que as cinzas aquecidas a temperaturas de 600ºC e 700ºC corresponderam aos melhores desempenhos (RIBEIRO; MORELLI, 2014).

2.5.2 Tempos de pega

As adições pozolânicas, a exemplo das cinzas volantes, e as adições cimentantes, como a escória de alto-forno, tendem a atrasar o tempo de início de pega do aglomerante. Essa tendência existe em função da redução do teor de cimento no material, bem como devido a interações que podem ocorrer entre as adições e o sulfato de cálcio (gesso) do cimento (SANTOS, 2011).

Paula (2009) avaliou os tempos de pega de pastas produzidas com 10%, 20% e 30% de teor de cinzas de bagaço de cana (em massa) e constatou que não houve adiantamento nem retardo para os tempos de início de pega, em relação à argamassa de referência.Para os tempos de fim de pega,todos os traços com cinzas apresentaram um retardo de apenas 10 minutos em relação à referência.ACBCA utilizada apresentou uma faixa granulométrica entre 1 e 14 μm. Segundo os pesquisadores, a incorporação da CBCA não exerceu alterações sobre os tempos de pega, tendo em vista que as reações pozolânicas ocorrem em estágios mais adiantados da hidratação do cimento, em torno de 7 a 15 dias após a confecção da pasta, entretanto uma adição com alto teor de carbono poderia alterar os tempos de pega.

Bezerra *et al.* (2016) avaliaram a influência da CBCA sobre os tempos de pega de pastas produzidas com 10%, 20% e 30% de substituição parcial (em volume) do cimento pelas cinzas. Os autores averiguaram que para todos os teores de substituição não houve alterações significativas para os tempos de início e fim de pega em relação aos tempos de pega registrados pela argamassa de referência, registrando variações inferiores a 5 minutos.

Jagadesh *et al*. (2019) por sua vez constataram que a incorporação da CBCA como substituição ao cimento retarda os tempos de início e fim de pega das pastas de cimento, uma vez que à medida que os autores aumentavam o percentual de

volume de cinzas nas pastas, seus respectivos tempos de início e fim de pega eram retardados.

2.5.3 Trabalhabilidade

A incorporação das cinzas de bagaço de cana-de-açúcar em materiais cimentícios como argamassas e concretos tende a reduzir a trabalhabilidade desses materiais, uma vez que as cinzas apresentam partículas com superfícies porosas e irregulares, o que exige uma maior quantidade de água para essas misturas. Ademais, quanto maior o teor de carbono das cinzas, menor será essa trabalhabilidade, pois maior será a quantidade de irregularidades dessas partículas (BATISTA, 2016).

No estudo de Bezerra *et al*. (2017), a consistência de argamassas com 35% de teor de substituição do cimento pelas cinzas do bagaço de cana foi avaliada e o resultado comparado com a argamassa de referência. O método utilizado foi *FlowTable Test* e os resultados indicaram que a dosagem com a CBCA resultou em argamassas com menor trabalhabilidade. Vale ressaltar que a CBCA utilizada por Bezerra *et al.* (2016) continha um diâmetro médio 13,04% inferior ao diâmetro médio do cimento e ambos apresentaram uma distribuição granulométrica semelhante.

No estudo de Batista (2016), a trabalhabilidade das argamassas foi avaliada por meio do teste da mesa de consistência (*FlowTable Test*), conforme instruções da ASTM C1437, e a trabalhabilidade dos concretos foi avaliada por meio do teste de abatimento (*Slump Test*) em conformidade com a ASTM C143. O autor adotou um fator água / cimento de 0,60 e confeccionou duas dosagens, a primeira com 100% de cimento (referência) e a segunda com 20% de percentual de substituição (em volume) do cimento pela CBCA, tanto para concretos quanto para argamassas. Os resultados evidenciaram que a introdução da CBCA nos materiais acarretou queda na trabalhabilidade, com uma redução de 18,75% da consistência para o concreto com CBCA e um decréscimo de 15,50% da consistência da argamassa com CBCA, quando comparados aos traços de referência. Batista (2016) atribuiu essa queda da trabalhabilidade ao fato de as partículas da CBCA apresentarem uma superfície porosa e irregular.

Mansaneira *et al*. (2017) avaliaram o índice de consistência de sete dosagens de argamassas, sendo essas: traço de referência, M1-10, M1-20, M1-30, M2-10, M2-

20, M2-30. A sigla M1 e M2 representam o tempo de moagem da amostra, sendo que M1 refere-se a uma hora de moagem e M2 corresponde a duas horas de moagem, e os número 10, 20 e 30 representam os percentuais de substituição do cimento pela CBCA (em massa). Foi observado que a introdução das cinzas reduziu a trabalhabilidade das argamassas, porém essa queda não foi proporcional ao percentual de substituição do cimento pelas cinzas. Ademais, constatou-se que o tempo de moagem da CBCA não influenciou nos resultados obtidos para o índice de consistência das argamassas.

Jagadesh *et al.* (2019) estudaram a consistência de argamassas com diferentes percentuais de incorporação da CBCA como substituição ao cimento, produzindo dosagens de até 40% de teor de substituição. Diante dos resultados, Jagadesh *et al.* (2019) averiguaram que a introdução das cinzas reduz a trabalhabilidade das misturas, uma vez que à medida que o teor de substituição aumentava, a quantidade de água também aumentava, a fim de se manter o índice de consistência das dosagens no valor de 105 ± 5 mm.

2.5.4 Resistência mecânica

A introdução da CBCA pode contribuir para a melhoria das propriedades mecânicas dos materiais cimentícios, seja pelo efeito físico de preenchimento de poros (efeito fíler) ou pelo efeito químico proveniente da atividade pozolânica das cinzas.

Ganesan, Rajagopal e Thangavel (2007) avaliaram o desempenho mecânico de argamassas e concretos produzidos com a substituição parcial do cimento pela CBCA, sendo que os teores de substituição (em massa) foram de 0%, 5%, 10%, 15%, 20%, 25% e 30%. As cinzas foram calcinadas a temperatura de 650º C e moídas até se obter um diâmetro médio de 5,4 µm. As argamassas foram submetidas aos ensaios de compressão aos 7 e 28 dias e os resultados evidenciaram que o valor da resistência foi crescente até o percentual de 10% e o traço com 20% de CBCA obteve desempenho mecânico equivalente ao desempenho do traço de referência. As amostras de concreto passaram pelos ensaios de compressão aos 7, 14, 28 e 90 dias e pelo ensaio de tração aos 28 dias. Os resultados para a compressão dos concretos evidenciaram que houve aumento da resistência mecânica para as dosagens com até 10% de percentual de cinzas e

os traços com mais de 20% de cinzas apresentaram resistência semelhante à referência. Os resultados para a tração indicaram que o desempenho mecânico dos concretos foi crescente até o percentual de 20% de CBCA. Diante dos resultados, os pesquisadores concluíram o percentual de 20% de substituição corresponde ao limite ideal de substituição.

Ribeiro e Morelli (2014) estudaram o desempenho mecânico de argamassas com 10% de CBCA em substituição (em massa) ao cimento. Para isso, elaboraram quatro dosagens: CBCA 500, com cinzas queimadas a 500º C; CBCA 600, com cinzas queimadas a 600º C; CBCA 700, com cinzas queimadas a 700º C; e o traço de referência, com 100% de cimento. A moagem não foi realizada. Foram realizados os ensaios de compressão axial e flexão para as amostras com 3, 7 e 28 dias de idade e os resultados evidenciaram que as amostras CBCA 600 e CBCA 700 alcançaram o melhor desempenho após 3 dias, porém para as demais idades não houve diferenças significativas entre as quatro dosagens. Os pesquisadores concluíram que as amostras com CBCA calcinadas a temperatura de 600º C e 700º C obtiveram os melhores resultados mecânicos.

No estudo de Bezerra *et al.* (2017), o desempenho mecânico de argamassas produzidas com a incorporação de 0%, 10%, 20% e 30% de CBCA em substituição ao cimento (em volume) foi avaliado. As cinzas foram moídas até se obter granulometria inferior a 0,045 mm e requeimadas a temperatura de 600º C. As argamassas foram submetidas aos ensaios de compressão aos 3, 7, 28 e 91 dias de idade e ao ensaio de flexão aos 28 dias. Diante dos resultados da compressão, os autores verificaram que o incremento da CBCA gerou queda da resistência para as argamassas com 3 dias de idade, mas para as demais idades as amostras apresentaram resultados semelhantes entre si, sendo que a dosagem com 20% de CBCA e 28 dias de idade obteve o melhor desempenho. Os resultados dos ensaios de flexão evidenciaram que as argamassas com 10% de cinzas obtiveram resistência semelhante ao traço de referência e os melhores desempenhos foram obtidos pelas argamassas com 20% e 30% de teor de substituição.

Batista (2016) avaliou o desempenho mecânico de argamassas e concretos produzidos com 0% e 20% de CBCA como substituição parcial (em volume) ao cimento. As cinzas foram requeimadas 650º C e moídas em moinho de bolas durante 60 minutos. O autor realizou ensaios de compressão axial e tração por

compressão diametral para as amostras com 7, 28, 90 e 180 dias de idade. Para a compressão das argamassas, os resultados evidenciaram que o desempenho aos 7 dias fica prejudicado com a adição da CBCA, mas a partir de 28 dias de idade a resistência das amostras com CBCA foi semelhante à resistência da referência, bem como para 90 e 180 dias de idade as amostras com CBCA obtiveram desempenho superior à dosagem de referência. Os resultados para a compressão dos concretos mostraram que as cinzas prejudicaram o desempenho mecânico das amostras aos 7 dias, mas a partir dos 28 dias de idade a resistência dos concretos com CBCA foi semelhante à resistência da dosagem de referência e o melhor desempenho dos concretos com CBCA foi obtido para os 180 dias de idade. Com relação aos resultados de resistência à tração, Batista (2016) averiguou que os melhores resultados para as dosagens com cinzas foram obtidos a partir de 28 dias de idade, entretanto, houve um grande desvio entre os resultados.

Na pesquisa de Mansaneira *et al.* (2017), foi estudado o desempenho mecânico de argamassas produzidas com 0%, 10%, 20% e 30% de teor de substituição do cimento pela CBCA. Para isso os autores elaboraram sete traços: referência (com 100% de cimento), CA-M1 10%, CA-M1 20%, CA-M1 30%, CA-M2 10%, CA-M2 20% e CA-M3 30%, sendo que M1 e M2 indicam o tempo (em horas) de moagem das cinzas em moinho de bolas, CA indica que a amostra contém CBCA e o percentual indica o teor de substituição do cimento pela cinza. Além da moagem, as cinzas foram submetidas à requeima em forno mufla sob temperatura de 600º C. Foram realizados ensaios de compressão axial para todas as argamassas aos 28 dias e os resultados evidenciaram que apenas as dosagens CA- M1 20% e CA-M2 10% registraram resistência mecânica superior à resistência obtida pela argamassa de referência.

2.5.5 Porosidade

A introdução da CBCA em materiais cimentícios pode contribuir para a redução da porosidade dos materiais cimentícios, tendo em vista que por meio do efeito fíler as cinzas geram o refinamento de poros. Além disso, as reações pozolânicas entre a CBCA e os produtos de hidratação do cimento geram compostos que contribuem para o aumento da massa específica e preenchimento de vazios,

conforme verificado por Bezerra *et al*. (2016) em estudo sobre os efeitos de CBCA recalcinadas sobre as propriedades de argamassas.

Ganesan *et al*. (2007) estudaram a absorção de água de concretos produzidos com a introdução de CBCA, fazendo-se uso de sete distintos teores de substituição (em massa): 0, 5, 10, 15, 20, 25 e 30%. As cinzas haviam sido queimadas a temperatura de 650º C e moídas de forma a obter diâmetro médio de 5,4 µm.Os autores verificaram que para os concretos com 28 dias de idade a introdução das CBCA acarretou aumento da absorção de água, porém aos 90 dias de idade os concretos com CBCA apresentaram valores de absorção inferiores ao traço de referência, o que indica que ocorreu o refinamento dos poros com o passar do tempo. Os resultados mostraram que a incorporação das cinzas reduziu a permeabilidade e porosidade dos concretos, sendo que o melhor desempenho foi obtido pelo traço com 20% de CBCA aos 90 dias de idade.

No estudo de Bezerra *et al*. (2017) foi avaliada a influência da incorporação da CBCA sobre o índice de absorção de argamassas. Os percentuais de substituição (em volume) adotados foram de 0%, 10%, 20% e 30% e as cinzas continham granulometria inferior a 0,045 mm e foram requeimadas a 650º C. Os resultados evidenciaram que a introdução da CBCA implicou em redução do teor de absorção, bem como em aumento da massa específica das argamassas, o que é favorável para a durabilidade dos materiais. Segundo os pesquisadores, a redução do índice de absorção de água indica que a introdução da CBCA acarretou uma diminuição da porosidade aberta e o aumento da massa específica pode ser atribuído à formação de fases microestruturais mais densas ou redução da porosidade fechada ou ainda refinamento dos poros abertos.

Cordeiro *et al*. (2018) estudaram o índice de absorção por imersão de concretos projetados para resistência de 35 MPa. Foram elaborados três traços: referência; CBCA-1, com cinzas submetidas apenas à moagem e; CBCA-2, com cinzas submetidas à moagem e requeima. O percentual de substituição do cimento pela CBCA foi de 20% (em volume). Ambas as amostras de cinza foram moídas em moinho de bolas até se obter granulometria inferior a 10µm e amostra de CBCA-2 foi calcinada a temperatura de 650º C. Os resultados evidenciaram que ambas as dosagens (CBCA-1 e CBCA-2) acarretaram queda da absorção de água de aproximadamente 16% em relação ao traço de referência.

3 MATERIAIS E MÉTODOS

3.1 MATERIAIS

A seguir estão listados os materiais que serão utilizados na presente pesquisa, sendo estes: cimento Portland CP V-ARI, cinzas de bagaço de cana-de-açúcar, areia normal de IPT e água fornecida pela Companhia de Saneamento de Minas Gerais (COPASA).

3.1.1 Cimento Portland

Foi utilizado o cimento CP V ARI com uma composição de 90% a 100% de clínquer (NBR 16697, ABNT 2018). Para estudo do efeito das adições da CBCA, o CP V-ARI corresponde à alternativa mais adequada, pois é o cimento com maior teor de clínquer comercialmente encontrado. O cimento foi adquirido junto à empresa Lafarge Holcim.

As Tabela 9 e

Tabela 10 apresentam alguns parâmetros físicos e químicos do cimento CP V-ARI disponibilizados pela fornecedora, bem como evidenciam os requisitos exigidos com base na NBR 16697 (ABNT, 2018).

Tabela 9–Caracterização física do cimento CP V - ARI

Teste	**Norma**	**U**nidade	**R**esultados	**Limites**
Resíduo na #400	-	(%)	2,5	-
Área específica (Blaine)	NBR 16697 (ABNT,2018)	(cm^2/g)	4572	$\geq$ 3000
Início de pega	NBR 16607 (ABNT, 2018)	(Min)	131	$\geq$60
Fim de pega *	NBR 16607 (ABNT, 2018)	(Min)	173	$\leq$600
*Caracterização obtida no presente estudo, pois não foi fornecido pela fabricante.				

Fonte: Lafarge Holcim, 2021; NBR 16697, 2018.

Tabela 10 - Caracterização química do cimento CP V ARI

Teste	Norma	Resultado	Limites
SO_3 (%)	NBR 16697 (ABNT,2018)	2,53	≤4,5
MgO (%)	NBR 16697 (ABNT,2018)	0,73	≤6,5
SiO_2 (%)	-	18,14	-
Al_2O_3 (%)	-	4,90	-
Fe_2O_3 (%)	-	2,99	-
CaO (%)	-	64,58	-
K_2O (%)	-	0,78	-
CO_2(%)	NBR 16697 (ABNT,2018)	4,87	≤5,5
Perda ao fogo (%)	NBR 16697 (ABNT,2018)	5,63	≤6,5
Resíduo insolúvel (%)	NBR 16697 (ABNT,2018)	0,95	≤3,5

Fonte: Lafarge Holcim, 2021; NBR 16697, 2018.

3.1.2 CBCA

As cinzas foram coletadas em agosto de 2020 e são provenientes da queima do bagaço. Durante o processo produtivo, o bagaço de cana é queimado em fornalha de alvenaria, de forma que a energia de sua queima é aproveitada para aquecer os alambiques, cuja composição é de cobre. A colheita da cana é realizada manualmente, o que contribui para reduzir a quantidade de areia presente na CBCA ao final do processo. Não há controle de temperatura da queima do bagaço.

O procedimento de peneiramento na malha de 4,75 mm contribuiu para a eliminação de boa parte da matéria orgânica e contaminantes. As cinzas passaram por dois tipos distintos de tratamento: a amostra CBCA-MR foi submetida à moagem

e requeima e a amostra CBCA-M foi submetida apenas à moagem. Os tratamentos são apresentados no item 3.2.1.

A Figura 6 apresenta a amostra de cinza de bagaço coletada na empresa. Na imagem nota-se a presença de bastante matéria orgânica. Um dos motivos que contribuem para isso, é a queima da lenha juntamente com o bagaço durante o processo de geração de energia.

Figura 6 - Amostra de CBCA coletada.

Fonte: o Autor, 2020.

3.1.3 Agregado Miúdo

A areia normal obtida junto ao IPT (Instituto de Pesquisas Tecnológicas) e disponibilizada pelo CEFET-MG foi utilizada como agregado miúdo. De acordo com a NBR 7215 (ABNT, 2019), as amostras são divididas em quatro frações de granulometrias distintas: areia fina, material retido entre as peneiras de abertura nominal 0,3 mm e 0,15 mm; areia média fina, retida entre as peneiras de malha 0,6 mm e 0,3 mm; média grossa, retida entre as malhas 1,2 mm e 0,6 mm e; grossa, material retido entre as aberturas nominais de 2,4 mm e 1,2 mm.

3.1.4 Água

A água utilizada foi fornecida pela Companhia de Saneamento de Minas Gerais (COPASA), empresa responsável pelo abastecimento de água de Belo Horizonte/MG.

3.2 MÉTODOS

3.2.1 Processamento das amostras de CBCA

As cinzas de bagaço de cana-de-açúcar coletadas foram transferidas para os laboratórios do Departamento de Engenharia Civil do CEFET-MG (Campus II, Belo Horizonte). Em seguida, a amostra foi peneirada na malha 4,75 mm, de forma que o material retido fosse descartado. Nesse processo, foi possível identificar e descartar materiais orgânicos e outras impurezas, conforme Figura 7.

Como pode ser observado na Figura 7, a CBCA peneirada apresentou coloração mais acinzentada e clara, o que pode indicar teores não muito elevados de carbono, uma vez que, segundo Torres (2018), quanto mais escura for a CBCA, maior será o seu respectivo teor de carbono.

Figura 7 - Material retido (esquerda) e passante (direita) na peneira #4,75 da CBCA.

Fonte: o autor, 2020.

As amostras de cinza foram submetidas à moagem em moinho de bolas cerâmicas de 25 mm e 55 mm de diâmetro, durante uma hora, conforme procedimentos realizados por Batista (2016). Antes da moagem, as cinzas foram novamente peneiradas, dessa vez na malha de 600 µm. A Figura 8 apresenta o moinho de bolas utilizado.

Figura 8 - Moinho de bolas cerâmicas com CBCA.

Fonte: o autor, 2020.

Parte das cinzas foi submetida à recalcinação. A exemplo do estudo de Bezerra *et al*. (2017), a temperatura de queima foi de 600ºC e o período de queima durou três horas.

3.2.2 Caracterização das amostras de CBCA

As amostras de CBCA foram submetidas aos seguintes ensaios de caracterização: estrutura cristalina por difração de raios X (DRX), composição química por espectroscopia por fluorescência de raios X (FRX), granulometria por difração a laser, determinação da massa específica, análise visual por microscopia eletrônica de varredura (MEV) e ensaio de perda ao fogo pela técnica de aquecimento a 950ºC.

3.2.2.1 Massa Específica

Para determinação da massa específica das amostras, a NBR 16605 (ABNT, 2017) foi utilizada como referência. O método de ensaio faz uso do frasco volumétrico Le Chatelier e seus respectivos procedimentos podem ser assim resumidos:

A) Inicialmente, insere-se o líquido no frasco até a marca de 0 a 1 cm^3. No caso das amostras de CBCA, foi utilizada água;
B) O interior do frasco é enxugado;
C) O frasco é tampado e imerso em um grande recipiente com água, denominado termoregulador, e ali permanece por pelo menos 30 minutos,

até que a temperatura do frasco se igualou à temperatura do termoregulador. Ambas são aferidas com termomêtro digital.

D) Registra-se a primeira medida de volume do líquido (V_1), entre 0 e 1 cm^3.

E) Insere-se a amostra cuidadosamente no frasco com o auxílio de um funil de haste curta, de forma a se evitar sua adesão às paredes do recipiente.

F) A massa da amostra inserida deve ser conhecida e o volume final ocupado deverá estar entre 18 e 24 cm^3. Registra-se a quantidade de amostra utilizada (m).

G) O frasco é novamente imerso no banho termoregulador e ali permanece até que ambos atinjam novamente o equilíbrio térmico, cerca de 30 minutos.

H) Por fim, o frasco é retirado do banho termoregulador e a medida final de volume registrada (entre 18 e 24 cm^3), correspondente a V_2.

O cáuculo da massa específica (ρ) se dará pela seguinte fórmula:

$$\rho = m /(V_2 – V_1) \quad (4)$$

Como a massa (m) é medida em gramas e o volume em cm^3, o resultado de ρ é dado em g/cm^3.

3.2.2.2 Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV)

O método de Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) permite a análise visual das amostras de CBCA em diferentes escalas microscópicas. Foi utilizado o microscópico eletrônico de varredura de baixa vácuo da marca Hitashi, modelo TM 3000, pertencente ao Laboratório de Mecânica dos Pavimentos e Tecnologia dos Materiais do Departamento de Engenharia de Transportes (DET), CEFET-MG, Campus I.

O equipamento apresenta uma aceleração variável entre 5 kV e 15 kV, bem como uma alta capacidade de ampliação, de até 30 mil vezes. O método de elétrons retro-espalhados foi utilizado, o que permite a diferenciação dos materiais pela sua cor, sendo que quanto mais escura a partícula, menor é sua densidade.

Foram capturadas imagens nas escalas de ampliação de 50, 200, 500 e 1000 vezes das cinzas in natura, da CBCA-M e da CBCA-MR, a fim de se identificar as

diferenças que os tratamentos de moagem e requeima podem acarretar na morfologia e homogeneidade das cinzas.

3.2.2.3 Estrutura Cristalina por Difração de Raios X (DRX)

Este ensaio foi realizado nos laboratórios do Departamento de Engenharia de Materiais (DEMAT) do CEFET-MG, Campus I. O equipamento é o difratômetro Raios X Shimadzu Maxima XRD-7000, conforme Figura 9:

Figura 9 - Difratômetro de Raios-X.

Fonte: o autor, 2020.

São adotados os seguintes parâmetros para esse ensaio: min = 5º; max = 80º; step = 0,02; velocidade = 1º/min; voltagem = 40 V; corrente = 30 I e comprimento de onda = 2 theta. As amostras de CBCA são peneiradas na peneira de malha 150 µm, posicionadas sobre o porta-amostra do equipamento e cobertas com uma placa de vidro. Ao final do ensaio, são obtidos os pontos necessários para a montagem do difratograma, gráfico que permite a identificação das fases cristalinas do material.

3.2.2.4 Espectroscopia por fluorescência de raios X (FRX)

Esse ensaio foi realizado nos laboratórios do Departamento de Engenharia de Materiais (DEMAT) do CEFET-MG, Campus I, e o equipamento a ser utilizado é o espectrômetro Bruker S2 Ranger. O resultado da espectroscopia por fluorescência de raios X (FRX) exibe a composição de óxidos das amostras.

3.2.2.5 Granulometria por Difração a Laser

O ensaio de granulometria a laser foi realizado nos laboratórios do Departamento de Engenharia Civil (DEC) do CEFET-MG, Campus II. O equipamento para esse procedimento é o Cilas Particle Size Analyzer 1090, conforme Figura 10. Os procedimentos com as cinzas foram realizados por via úmida.

Figura 10 - Equipamento para ensaio de Granulometria a Laser.

Fonte: Batista, 2016.

3.2.2.6 Perda ao Fogo

O ensaio de perda ao fogo foi realizado conforme os requisitos da NBR NM 18 (ABNT, 2012). O ensaio foi realizado em mufla disponibilizada nos laboratórios do Departamento de Engenharia de Materiais (DEMAT) do CEFET-MG, Campus I. Esse procedimento consiste em aferir a perda de massa da CBCA após o aquecimento da amostra em temperatura de 950º C por pelo menos 50 minutos. Para o presente estudo, o tempo de permanência sob a temperatura de 950º C foi de 60 minutos.

3.2.3 Caracterização do Cimento Portland

A caracterização físico-química do cimento CPV foi disponibilizada pelo fabricante.Para efeito de comparação entre a granulometria e massa específica entre o cimento e as CBCA,foram realizados o ensaio de granulometria por difração à laser e o ensaio de determinação da massa específica conforme a NBR 16605 (ABNT, 2017), sendo utilizado o querosene como dispersor.

3.2.4 Tempos de pega

Os tempos de início e fim de pega das pastas de cimento puro e com substituição parcial do cimento pelas cinzas foram determinados conforme as

prescrições da NBR 16607 (ABNT, 2018), fazendo-se uso do aparelho de Vicat. Esse ensaio foi executado nos laboratórios do Departamento de Engenharia Civil (DEC) do CEFET-MG.Foram aferidos os tempos de pega da pasta de referência e de pastas com substituição parcial do cimento pelas cinzas moídas em 10% (CBCA-M 10) e 20% (CBCA-M 20), bem como das pastas com substituição do cimento pelas cinzas moídas e requeimadas em 10% (CBCA-MR 10) e 20% (CBCA-MR 20). O teor de substituição foi calculado pelo volume dos materiais.

A relação água/cimento (a/c) do traço de referência foi determinada conforme procedimentos da NBR 16606 (ABNT, 2018). A amostra foi classificada como pasta de consistência normal quando foi adotada uma relação a/c de 0,29. Dessa forma, a quantidade de água foi mantida constante para todos os demais traços.

3.2.5 Atividade Pozolânica

A atividade pozolânica das cinzas foi aferida a partir de dois métodos distintos: determinação do Índice de Atividade Pozolânica (IAP) por desempenho mecânico com cimento Portland e Método de Condutividade de Luxán *et al*. (1989).

3.2.5.1 Índice de Atividade Pozolânica (IAP) com cimento Portland

Esse ensaio visa medir o desempenho mecânico de argamassas produzidas com a adição de algum material pozolânico e será realizado de acordo com os requisitos da NBR 5752 (ABNT, 2014). Dessa forma, foram produzidos corpos de prova de argamassa com 100% de matriz cimentícia, como também corpos de prova de argamassas com 25% de substituição (em massa) do cimento Portland pelas amostras de cinzas (CBCA-M e CBCA-MR). Os procedimentos de mistura, moldagem, cura e determinação da resistência à compressão são realizados de acordo com os requisitos da NBR 7215 (ABNT, 2019). Os corpos de prova foram submetidos ao ensaio de compressão axial após 28 dias de cura e o cálculo do Índice de Desempenho é feito de acordo com a Equação 4:

$$I_{CBCA} = (f_{cB} / f_{cA}) \times 100 \quad (5)$$

Onde:

- I_{CBCA} corresponde ao Índice de Desempenho obtido pelas argamassas com 25% de CBCA, em percentual;

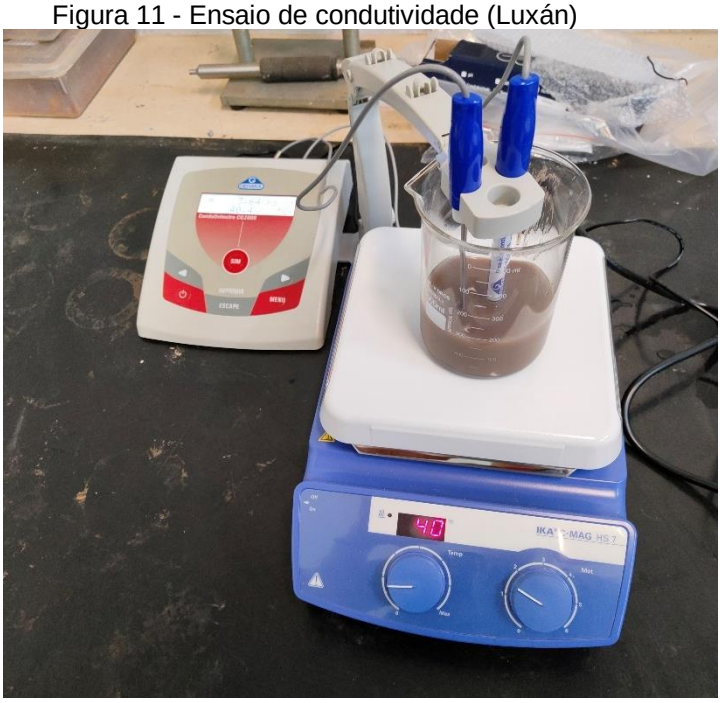
- f_{cB} representa a média de resistência mecânica, em MPa, obtida pelas argamassas com 25% de CBCA;
- f_{cA} corresponde média de resistência mecânica, em MPa, obtida pelas argamassas com 100% de matriz cimentícia.

Conforme parâmetros estabelecidos pela NBR 12653 (ABNT, 2014), para que um material possa ser considerado pozolânico, ele deve apresentar Índice de Desempenho mecânico correspondente a pelo menos 90% do desempenho atingido pela argamassa de referência.

3.2.5.2 Método de Condutividade (Luxán *et al*., 1989)

Para a execução desse método, uma solução saturada de 200 ml $Ca(OH)_2$ foi aquecida a 40ºC e mantida em contato com um termômetro e um condutivímetro. Cinco gramas da cinza em estudo (CBCA) foram aferidos e adicionados à solução quando a mesma atinge os 40ºC. A condutividade inicial e após 120 segundos da adição da cinza são registradas, de forma que a diferença de condutividade durante esse intervalo de tempo corresponde ao resultado. A solução deve ser mantida em agitação durante todo procedimento.

Figura 11 - Ensaio de condutividade (Luxán)



Fonte: autor, 2021.

Esses procedimentos são recomendados por Luxán *et al*. (1989), foram adotados para a CBCA-M e CBCA-MR e executados no Laboratório de Engenharia de Transportes, do CEFET-MG, campus I.

Caso a diferença de condutividade seja inferior a 0,4 mS/cm, o material será não pozolânico. Se a diferença estiver entre 0,4 e 1,2 mS/cm, o material terá pozolanicidade variável e, se a diferença for superior a 1,2 mS/cm, significa que a amostra terá boa pozolanicidade(LUXÁN; MADRUGA; SAAVEDRA, 1989).

3.2.6 Confecção das argamassas

A produção das argamassas se deu conforme os procedimentos da NBR 7215 (ABNT, 2019). Foram adotados percentuais de substituição de 10% e20% (em volume) do cimento pelas cinzas, pois essa faixa de percentual gerou resultados satisfatórios nas propriedades mecânicas e de durabilidade das argamassas, conforme verificado por Ganesan, Rajagopal e Thangavel (2007), Ribeiro e Morelli (2014), Bezerra *et al*. (2017) e Batista (2016).

O percentual de subsituição foi calculado pelo volume, uma vez que cimento e CBCA apresentaram massas específicas distintas e dessa forma, as proporções água/ligante e ligante/agregado foram mantidas constantes em volume.

A relação água: ligante foi de 0,48, conforme dosagem prevista pela NBR 7215 (ABNT, 2019). Os traços com as CBCA foram calculados após a determinação da massa específica das cinzas. A Tabela 11 apresenta os valores de massa específica obtidos para as amostras de CBCA e de cimento CP V ARI.

Tabela 11 - Massa Específica das CBCAs e cimento CP V ARI

Amostra	**Massa específica (g/cm^3)**
CBCA-M	2,505
CBCA-MR	2,545
CP V – ARI	3,027

Fonte: o autor (2020).

A partir dos resultados de massa específica, as dosagens de argamassas foram calculadas. Conforme estudo de Bezerra *et al*. (2017), a relação água/ligante e a razão agregado/ligante foram mantidas constantes, em volume, para todos os traços. A Tabela 12 exibe as dosagens.

Tabela 12 - Dosagens das argamassas

Dosagem	Cimento (g)	CBCA (g)	Ligante (g)	Areia (g)	Água (g)	Água/ligante (massa)	Água/ligante (volume)
Referência	624	0	624	1872	300	0,481	1,455
CBCA-M 10	561,60	51,63	613,23			0,489	
CBCA-M 20	499,20	103,27	602,47			0,498	
CBCA-MR 10	561,60	52,46	614,06			0,489	
CBCA-MR 20	499,20	104,92	604,12			0,497	

Fonte: o autor, 2021.

Os procedimentos de moldagem foram realizados nos laboratórios de Departamento de Engenharia Civil do CEFET-MG (campus II). As amostras foram misturadas em argamassadeira, conforme os tempos previstos pela NBR 7215 (ABNT, 2019). Foram produzidos corpos de prova cilíndricos, 50 mm de diâmetro por 100 mm de altura.O adensamento foi manual com a aplicação de 30 golpes de soquete em 4 camadas. Os moldes cilíndricos foram revestidos com um pouco de óleo mineral, de forma a facilitar o processo de desfôrma, que aconteceu 24 horas após o processo de moldagem.

Após a desfôrma, as argamassas foram submetidas à cura úmida e aos 7, 28 e 91 dias de idade foram submetidas aos ensaios mecânicos. O ensaio de determinação do índice de consistência foi executado no mesmo dia da confecção das argamassas.

3.2.7 Índice de Consistência

O Índice de Consistência das argamassas foi determinado seguindo-se a NBR 13276 (ABNT, 2016). As amostras produzidas são posicionadas na mesa de abatimento para a realização do *Flow Table Test*. Deve-se aferir 3 medidas diâmetro de espalhamento da argamassa e a média dessas medidas corresponde ao valor de índice de consistência da amostra, medido em milímetros. A **Error! Reference source not found.** apresenta a mesa utilizada para o *flow table test*.

Figura 12 - Mesa para o ensaio de Índice de Consistência.

Fonte: o autor, 2020.

3.2.8 Resistência à Compressão Axial

Os corpos de prova foram retificados,de forma que suas superfícies inferior e superior fossem aplainadas, para serem submetidos ao ensaio de compressão axial, permitindo que a carga oferecida pela Prensa Mecânica seja uniformemente distribuída. Os ensaios de compressão foram executados para os CPs com 7, 28 e 91 dias de idade. Utilizou-se a Prensa EMIC,disponibilizada pelo Laboratório do Departamento de Engenharia Civil (DEC) do CEFET-MG, com capacidade de 2000 KN e a taxa de incremento do ensaio foi de 0,20 MPa/s.Quatro CPs para cada traço e idade foram submetidos ao ensaio de compressão. O cálculo da resistência à compressão se dá conforme a Equação 6:

$$F_{cj} = \frac{4F}{\pi D^2} \tag{6}$$

Onde:

$F_{cj} =$ resistência à compressão axial em Megapascal (MPa);

F = carga de ruptura do corpo de prova em newtons (N);

D = diâmetro médio do corpo de prova em milímetros (mm);

A análise estatística foi realizada por meio do método “ANOVA: Fator Único”, disponível no software Microsoft Excel. Este método envolve o cálculo comparativo da variância obtida por cada amostra, sendo utilizado um erro admissível de 5%. A fonte de variação foi avaliada entre os grupos, com a análise comparativa dos

resultados obtidos para cada idade. Os resultados serão considerados estatisticamente diferentes se o valor-p for superior ao erro admissível (5%) ou se o valor de F for maior que o $F_{crítico}$ e, caso contrário, os resultados obtidos pelas amostras são classificados como estatisticamente semelhantes.

3.2.9 Resistência à Tração por Compressão Diametral

Esse ensaio é realizado conforme os requisitos da NBR 7222 (ABNT, 2011), com uso da mesma Prensa Mecânica utilizada para os ensaios de compressão axial. Realizou-se este ensaio para os corpos de prova com 28 dias de idade, sendo utilizados 4 CPs por traço. A taxa de incremento é 0,05 MPa/s. Segundo a NBR 7222 (ABNT, 2011), a resistência à tração por compressão diametral é calculada de acordo com a Equação 7:

$$f_{ct,sp} = 2F/(\pi dL) \quad (7)$$

Onde:

F: Força máxima obtida no ensaio, em Newtons (N);

d: diâmetro do corpo de prova, em milímetros;

L: comprimento do corpo de prova, em milímetros.

A análise estatística será realizada através do método ANOVA: Fator Único, sob as mesmas condições da análise utilizada para os resultados do ensaio de compressão das argamassas.

3.2.10 Absorção de Água por Imersão

Os ensaios de absorção de água foram executados para as argamassas com 90 dias de idade, em conformidade com os procedimentos da NBR 9778 (ABNT, 2005).

Segundo a NBR 9778, (ABNT, 2005), a Absorção de água por imersão (A) é definida como o processo pelo qual a água é conduzida e tende a ocupar os poros permeáveis de um corpo sólido poroso. Levando-se em conta a aplicação dessa Norma, a absorção equivale também ao incremento de massa de um corpo sólido

poroso em função da penetração de água em seus poros permeáveis, em relação à sua massa no estado seco.

Utilizou-se dois corpos de prova (50 mm de diâmetro por 100mm de altura) de argamassa para cada traço.Abaixo estão os procedimentos adotados:

1) Secagem das amostras em estufa a uma temperatura de 105ºC (com tolerância de variação de temperatura para mais ou menos 5ºC) durante 72 horas. A massa seca (m_s) das amostras poderá ser registrada.
2) Imersão da amostra em água a temperatura de 23ºC e mantê-la imersa por 72 horas.
3) Retirada do corpo de prova da água, que deverá ser enxugado com um pano úmido e sua massa (m_{sat}) será registrada.

A Equação 8 apresenta o cálculo da absorção de água (A) em porcentagem:

$$A = \frac{m_{sat} - m_s}{m_s} \times 100 \quad (8)$$

Onde:

A = Absorção de água da amostra (porcentagem);

m_{sat} = Massa da amostra saturada em água após a imersão (g);

m_s = Massa da amostra seca em estufa (g);

4 RESULTADOSE DISCUSSÃO

4.1 RESULTADOS DE CARACTERIZAÇÃO

4.1.1 Caracterização visual da CBCA

A Figura 13, a Figura 14 e a **Error! Reference source not found.** apresentam o aspecto visual das cinzas in natura, moídas (CBCA-M) e moídas e requeimadas (CBCA – MR). A Figura 13 mostra a CBCA *in natura* passante na malha 4,75mm (a), retida e passante na malha 600µm (b) e passante na malha 600µm. A amostra passante na peneira de malha 4,75mm apresentava ainda uma quantidade considerável de matéria orgânica e contaminantes. Ao peneirar a CBCA in natura na malha 600µm, nota-se que boa parte desses contaminantes ficou retida. Observa-se o aspecto acinzentado predominante nessas amostras.

Figura 13 - CBCA *in natura(*a), retida e passante(b) e peneirada na malha 600µm.

(a) (b) (c)

Fonte: o autor, 2021.

A Figura 14 (a) mostra o aspecto visual da amostra de cinza após o peneiramento na malha 600µm e moagem (CBCA-M). Foi observado um aspecto mais homogêneo da amostra, quando comparada à cinza in natura. O aspecto acinzentado também foi predominante nessa amostra.

Figura 14 - Aspecto visual da CBCA-M (a) e da CBCA-MR (b).

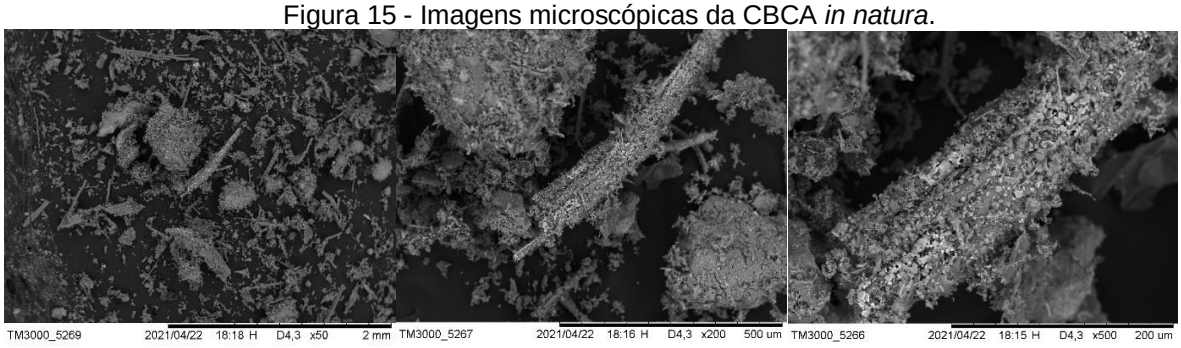
Fonte: o autor, 2021.

A Figura 14 (b) apresenta o aspecto visual da amostra de cinza após o peneiramento na malha 600µm, moagem e requeima (CBCA-MR). Nota-se um aspecto mais homogêneo, quando comparado à cinza in natura, e a cor predominante dessa amostra foi o marrom claro.

4.1.2 Análise microscópica

A seguir são apresentadas algumas imagens obtidas no ensaio de microscopia eletrônica de varredura (MEV). A Figura 15 apresenta a amostra de CBCA *in natura* nas escalas de ampliação de 50x (a), 200x (b) e 500x (c). Nota-se que esta amostra apresentou grande heterogeneidade na dimensão e morfologia das partículas, com marcante presença de fibras delgadas. Além disso, observa-se que a dimensão máxima das fibras ficou em torno de 0,5 mm.

Figura 15 - Imagens microscópicas da CBCA *in natura*.

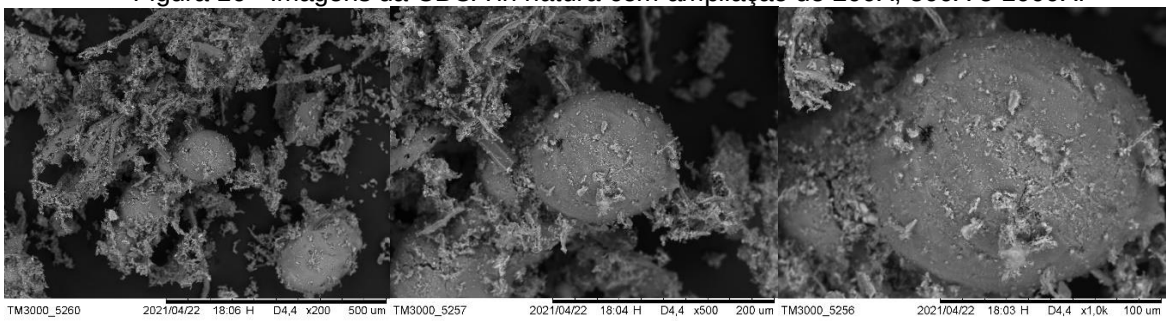


(a) (b) (c)

Fonte: o autor, 2021.

A Figura 16 exibe a CBCA *in natura* nas escalas 200X (a), 500X (b) e 1000X (c) de ampliação, na qual foi possível identificar uma partícula com dimensão aproximadamente esférica e ordem de grandeza de cerca de 120 µm.

Figura 16 - Imagens da CBCA *in natura* com ampliação de 200X, 500X e 1000X.

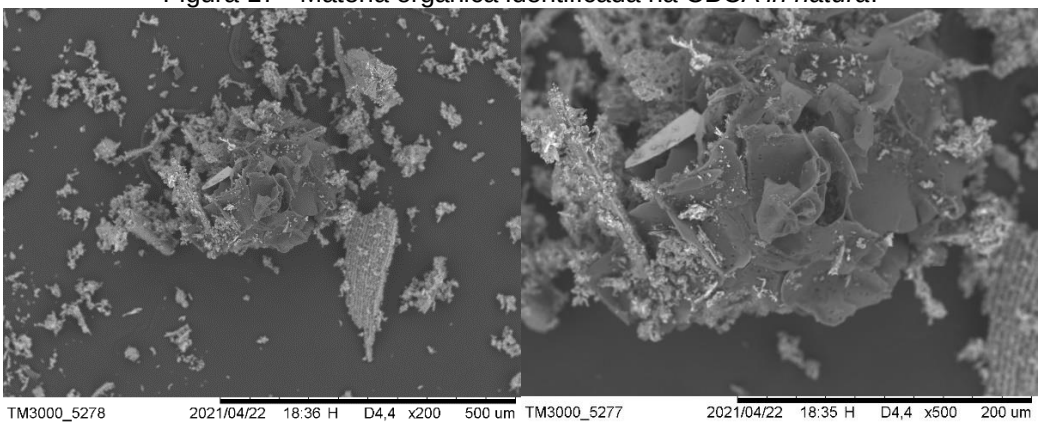


(a) (b) (c)

Fonte: o autor, 2021.

A Figura 17 mostra uma partícula de matéria orgânica encontrada na cinza *in natura* nas escalas de aumento de 200X (a) e 500X (b). A técnica do MEV com elétrons retro-espalhados permite a identificação de partículas com diferentes densidades, sendo que quanto mais escuro, menos denso será o material. Essa técnica permitiu a detecção dessa partícula de matéria orgânica, que apresenta baixa densidade e logo, exibe coloração mais escura. Nota-se que essa partícula apresenta dimensão de cerca de 200 µm.

Figura 17 - Matéria orgânica identificada na CBCA *in natura*.



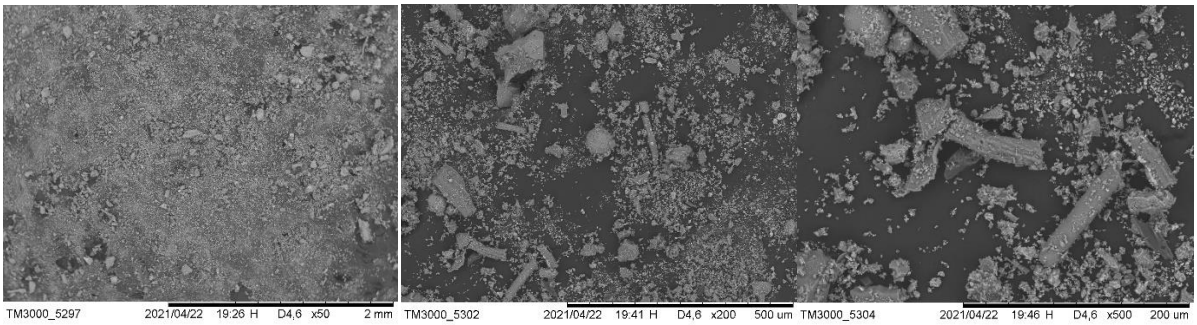
(a) (b)

Fonte: o autor, 2021.

A Figura 18 exibe a amostra de CBCA-M nas escalas de 50X (a), 200X (b) e 500X (c). Observa-se que a CBCA-M exibe maior homogeneidade tanto na morfologia quanto na granulometria quando comparada à CBCA *in natura*. Nota-se

também que as fibras não apresentam menor aspecto delgado, o que evidencia a efetividade do procedimento de moagem.

Figura 18 - Imagens da CBCA-M com ampliação de 50X, 200X e 500X.

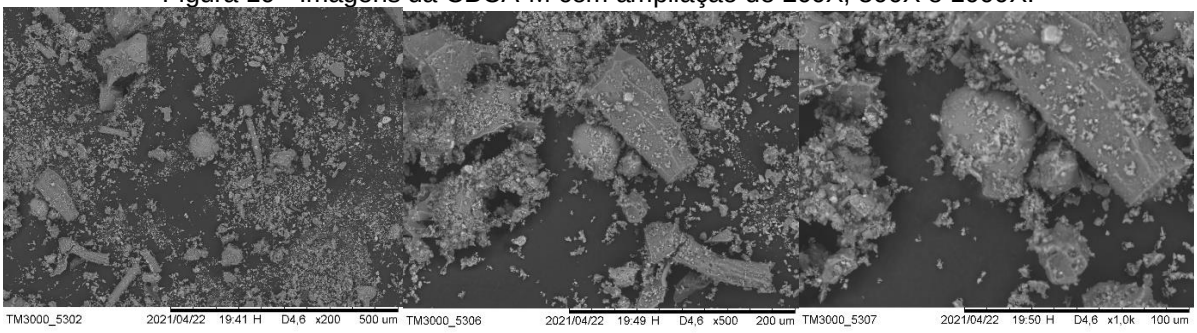


(a) (b) (c)

Fonte: o autor, 2021.

Na Figura 19 são exibidas imagens da CBCA-M nas escalas de 200X (a), 500X (b) e 1000X (c) de ampliação. O foco dessa imagem foi uma partícula com dimensões aproximadamente esféricas cuja dimensão contém cerca de 40µm. Ademais, é possível identificar fragmentos de fibras, provavelmente quebradas durante o processo de moagem.

Figura 19 - Imagens da CBCA-M com ampliação de 200X, 500X e 1000X.



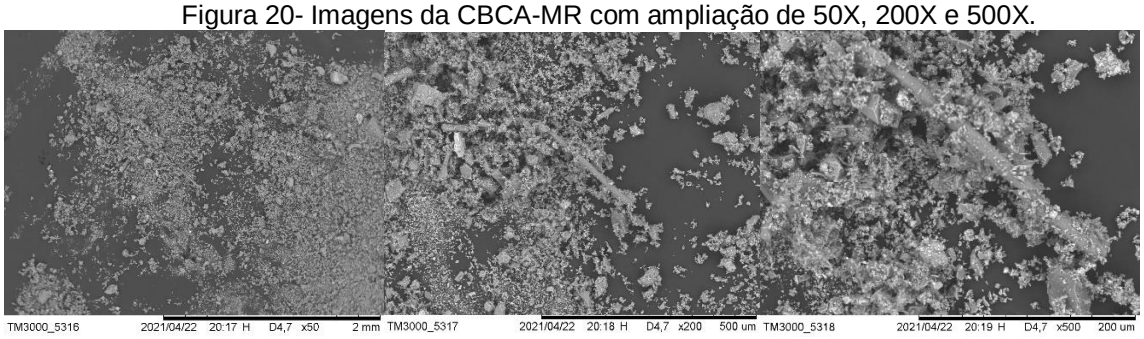
(a) (b) (c)

Fonte: o autor, 2021.

A Figura 20 exibe a CBCA-MR nas escalas de aumento de 50X (a), 200X (b) e 500X (c). Identificou-se que a CBCA-MR apresentou fibras de menor cumprimento e menor presença de matéria orgânica, o que conferiu maior homogeneidade de morfologia e granulometria em relação às demais amostras. Bezerra *et al*. (2017) também identificaram esse aumento da homogeneidade da CBCA devido aos processos de requeima e moagem, para as mesmas escalas de ampliação.

Na Figura 20 (c) foi possível identificar uma fibra com dimensão de cerca de 0,3 mm.

Figura 20- Imagens da CBCA-MR com ampliação de 50X, 200X e 500X.

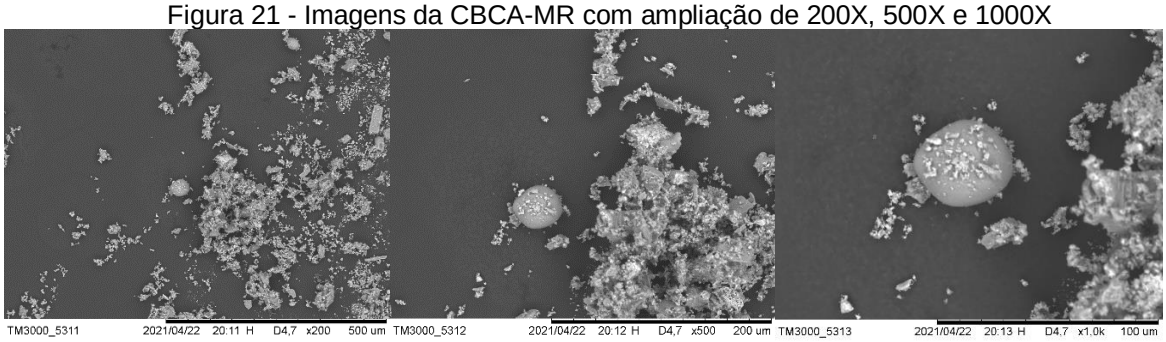


(a) (b) (c)

Fonte: o autor, 2021.

A Figura 21 exibe uma pequena amostra de CBCA-MR nas escalas de ampliação de 200X (a), 500X (b) e 1000X (c), com enfoque em uma partícula de dimensões aproximadamente esféricas, na ordem de 50µm.

Figura 21 - Imagens da CBCA-MR com ampliação de 200X, 500X e 1000X



(a) (b) (c)

Fonte: o autor, 2021.

4.1.3 Espectroscopia por fluorescência de raios X (FRX) e Perda ao fogo

A Tabela 13 exibe os resultados para a composição química e perda ao fogo (PF) das amostras de CBCA in natura, CBCA-M e CBCA-MR obtidas:

Tabela 13 - Composição química e perda ao fogo das amostras de CBCA.

Amostra	**SiO_2**	**K_2O**	**CaO**	**P_2O_5**	**SO_3**	**Fe_2O_3**	**MgO**	**Al_2O_3**	**MnO**	**CuO**	**PF**
CBCA *in natura*	30,45	28,62	15,01	5,55	5,31	4,70	2,92	2,60	0,41	0,37	----
CBCA-M	36,43	27,11	12,93	4,74	4,66	6,37	2,23	3,84	0,39	0,31	8,6
CBCA-MR	39,81	25,87	11,50	4,57	4,59	5,75	2,15	4,26	0,33	0,28	4,9

Fonte: o autor, 2021.

Os resultados registrados na Tabela 13 indicam que a requeima sob temperatura de 600ºC contribuiu para a eliminação de uma parcela significativa de matéria orgânica, uma vez que a perda ao fogo registrada pela CBCA-MR foi 43,02% inferior ao valor obtido pela amostra de CBCA-M.Resultados semelhantes foram encontrados por Cordeiro, Barroso e Toledo Filho (2017), no qual a perda na ignição da CBCA requeimada a 600ºC foi equivalente a cerca de 10% da perda ao fogo obtida pela CBCA *in natura.*

Frías, Villar e Savastano (2011) também verificaram que a CBCA requeimada, utilizando patamares de 400ºC e 800ºC, apresentou perda ao fogo muito inferior a uma amostra de CBCA produzida na temperatura de 300ºC.

Com relação à composição de óxidos das amostras de CBCA, nota-se a predominância da sílica, sendo que a CBCA-MR apresentou percentual de SiO_2 (39,81%) muito semelhante ao percentual registrado pela CBCA estudada por Bezerra *et al*. (2017) (40,47%), cuja amostra também foi submetida à requeima sob 600ºC.

Comparando-se os resultados obtidos para a CBCA-M e CBCA-MR, observa-se que o procedimento de requeima não gerou alterações significativas na composição de óxidos da CBCA, conforme se verifica na Tabela 13.

A NBR 12653 (ABNT, 2015) estabelece que o material deve conter pelo menos 70% de SiO_2+Al_2O_3+Fe_2O_3 para ser considerado material pozolânico de classe C ou N, ou então deve ser constituído de, no mínimo, 50% de SiO_2 +Al_2O_3+Fe_2O_3 para se enquadrar na classe N de material pozolânico. Com base nos resultados, constata-se que nenhuma das amostras de CBCA atende aos requisitos de material pozolânico estabelecidos pela referida Norma.

É possível observar que a CBCA utilizada na pesquisa apresenta um elevado teor de óxido de potássio quando comparadas com as cinzas estudadas por Cordeiro, Barroso e Toledo Filho (2017), Cordeiro e Kurtis (2017) e Bezerra *et al*. (2017). Uma possível explicação para o percentual de óxidos de potássio identificado pode ser o uso de fertilizantes NPK na cultura da cana. Além de fósforo e nitrogênio, este tipo de fertilizante apresenta como um dos principais constituintes, o potássio.

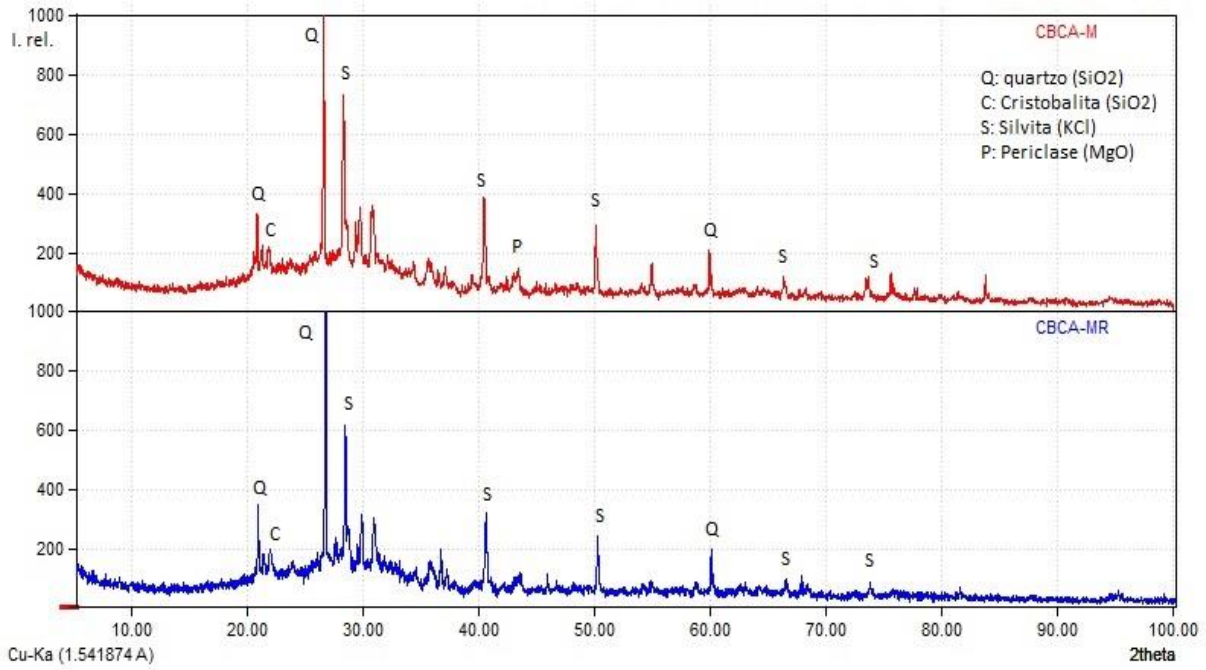
Entretanto, é importante ressaltar que as CBCAs utilizadas nas pesquisas supracitadas são originárias de indústrias de açúcar ou álcool, geralmente com

queima controlada. Já a CBCA do presente estudo é proveniente da produção da cachaça artesanal, na qual a temperatura de queima do bagaço não é controlada e cujo processo produtivo se difere muito das grandes indústrias sucroalcooleiras. Segundo de Pádua *et al*. (2016), o alto teor de K_2O pode favorecer a ocorrência da reação álcali-agregado em materiais cimentícios, fator desfavorável à durabilidade dos materiais.

4.1.4 Estrutura Cristalina por Difração de Raios X (DRX)

A Figura 22 exibe os difratogramas obtidos pelas amostras de CBCA.

Figura 22 - Difratogramas da CBCA-M e CBCA-MR



Fonte: o autor, 2021.

Nota-se que a CBCA-M e a CBCA-MR exibiram muitos picos cristalinos em comum, com destaque para o quartzo e a cristobalita, compostos basicamente por sílica (SiO_2), resultado coerente com a composição de óxidos obtida no ensaio de FRX. Além disso, os difratogramas evidenciam que a requeima não alterou o caráter cristalino da amostra. Ou seja, ambas as amostras apresentam aspecto de materiais não pozolânicos, resultado coerente com os resultados para índice de atividade pozolânica.

4.1.5 Distribuição granulométrica

A distribuição granulométrica do cimento CP V ARI, da CBCA-M e CBCA-MR está disposta na Tabela 14, sendo que D10, D50 e D90 significam o diâmetro médio após o ensaio de 10%, 50% e 90% da amostra acumulada.

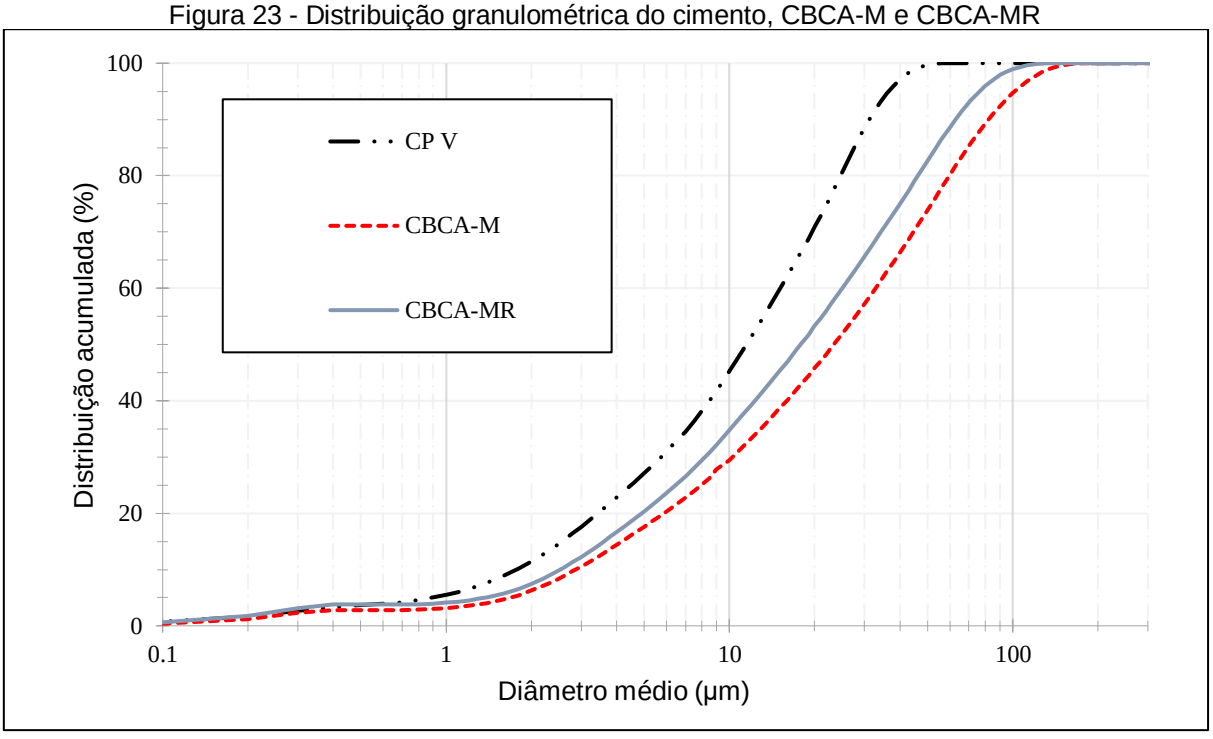
Tabela 14 - Distribuição granulométrica do cimento, CBCA-M e CBCA-MR

Distribuição acumulada	**Amostra**		
	Cimento CP V ARI	**CBCA-M**	**CBCA-MR**
D10	1,71	2,87	2,53
D50	11,40	23,38	17,85
D90	31,26	82,13	62,79
Diâmetro médio (µm)	14,28	34,09	26,14

Fonte: o autor, 2021.

Nota-se que, entre as três amostras, o cimento apresentou o menor diâmetro médio (14,28 µm), a CBCA-MR apresentou diâmetro médio de 26,14 µm, valor 83,05% superior ao diâmetro do cimento, e a CBCA-M apresentou diâmetro médio de 34,09 µm, valor superior em 138,72% em relação ao cimento e 30,41% acima do diâmetro médio obtido por CBCA-MR. Esses resultados são coerentes com a curva granulométrica obtida para as amostras, dispostas na Figura 23.

Figura 23 - Distribuição granulométrica do cimento, CBCA-M e CBCA-MR



Fonte: o autor, 2021.

Os resultados obtidos para a granulometria evidenciam que as partículas do cimento CP V ARI possuem tamanho médio inferior às partículas das cinzas, bem como mostram que a CBCA-MR apresentou tamanho médio inferior em relação à amostra de CBCA-M. Tal fato indica que o procedimento de requeima a 600 ºC contribuiu para a redução do diâmetro médio das cinzas, bem como contribuiu para o aumento da homogeneidade na granulometria da CBCA, o que também foi identificado na análise de Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) da CBCA-M e CBCA-MR.

4.1.6 Massa específica

A Tabela 15 apresenta os valores obtidos para a massa específica das amostras da CBCA-M, CBCA-MR e cimento CP V ARI.

Tabela 15 - Massa Específica CBCA-M, CBCA-MR e cimento.

Amostra	**Massa específica (g/cm^3)**
CBCA-M	2,505
CBCA-MR	2,545
Cimento CP V - ARI	3,027

Fonte: o autor (2021).

Diante dos resultados, nota-se que o processo de requeima a 600ºC não gerou alteração significativa na massa específica das cinzas, sendo que a CBCA-MR apresentou um acréscimo no valor da massa específica de apenas 1,59% em relação ao resultado obtido pela CBCA-M. Esse fato pode indicar que a CBCA já tenha sido submetida a essa temperatura, durante o processo de queima do bagaço na usina produtora de cachaça artesanal. Ademais, constata-se que o cimento Portland CPV – ARI apresentou massa específica superior às cinzas, registrando aumento de cerca de 20% neste quesito em relação às amostras de CBCA.

4.2 TEMPO DE PEGA

Os resultados de tempos de início e fim de pega de cada traço de pasta de cimento são dados, em minutos, na Tabela 16:

Tabela 16 - Resultados dos Tempos de Pega

Amostra	**Tempo de pega (min)**	
	Início	**Final**

Referência	113	173
CBCA-M 10	110	197
CBCA-M 20	146	240
CBCA-MR 10	114	190
CBCA-MR 20	110	186

Fonte: o autor (2021).

Com base nos resultados, nota-se que apenas a pasta CBCA-M 20 apresentou diferença significativa do tempo de início de pega em relação aos demais traços, registrando um acréscimo de 29,20% em relação à pasta referência.

Com relação aos tempos de fim de pega, todas as dosagens com incorporação das cinzas registraram retardo, sendo que a CBCA-M 10, CBCA-MR 10 e CBCA-MR 20 registraram acréscimo no tempo de fim de pega em relação à referência de 13,87%, 9,82% e 7,51%, respectivamente. A exemplo do tempo de início de pega, o traço com 20% de cinzas moídas (CBCA-M 20) registrou o maior tempo de fim de pega, obtendo um retardo de 38,72% em relação à pasta de referência.

Assim como verificado por Paula *et al*. (2009), as cinzas submetidas à moagem e requeima (CBCA-MR) não alteraram o tempo de início de pega, uma vez que as reações desse material ocorrem em estágios mais avançados de hidratação do cimento. Já para os tempos de fim de pega, a CBCA-MR apresenta retardo significativo em relação à referência, assim como foi verificado por autores que avaliaram o tempo de fim de pega de pastas produzidas com CBCA moída e requeimada (PAULA *et al*., 2009; GANESAN, RAJAGOPAL e THANGAVEL, 2007).

O aumento dos tempos de início e fim de pega da amostra CBCA-M 20 pode ser explicado pelo maior teor de carbono presente na pasta, uma vez que essa dosagem apresenta o maior percentual (20% em volume) da cinza com maior perda de ignição. Cordeiro, Barroso e Toledo Filho (2017) verificaram que os tempos de pega de pastas produzidas com a adição de CBCA não requeimada foram muito superiores aos tempos da pasta referência e da pasta produzida com a CBCA requeimada. Segundo os autores, a alta taxa de ignição, indicativo de alto percentual de carbono, foi o principal motivo causador desse retardo.

Cordeiro, Barroso e Toledo Filho (2017) correlacionaram o retardo nos tempos de pega das pastas com CBCA não requeimada com a inferioridade dos

valores de resistência à compressão de argamassas produzidas com essas mesmas cinzas. A mesma tendência pode ser identificada no presente estudo, ao se comparar os resultados obtidos para a compressão das argamassas CM 20 e CMR 20 em idades precoces, ou seja, aos 7 dias. Essa correlação indica que a introdução de CBCA com alto teor de carbono retarda a cinética de hidratação dos materiais cimentícios.

4.3 ATIVIDADE POZOLÂNICA

Diante dos requisitos químicos estabelecidos pela NBR 12653 (ABNT, 2015) e dos resultados de composição química obtidos pelas cinzas, a CBCA-M e CBCA-MR são considerados materiais não pozolânicos.

Os resultados para IAP das cinzas, conforme NBR 12653 (ABNT, 2014), são dados na Tabela 17.

Tabela 17 - Resultados da atividade pozolânica

	Argamassa de cimento 28d	
Amostra	**Resistência à compressão (Mpa)**	**Índice de pozolanicidade (%)**
Referência	44,50	100 %
CBCA-M	30,42	68,35 %
CBCA-MR	36,15	81,23 %

Fonte: o autor (2021).

Nota-se que a argamassa cimentícia com a CBCA-MR apresentou Índice de Atividade Pozolânica (IAP) 12,88% superior ao IAP obtido pela argamassa com CBCA-M. A mesma tendência foi identificada por Cordeiro, Barroso e Toledo Filho (2017), no qual a cinza requeimada e moída apresentou Índice de Atividade Pozolânica 23% superior a cinza moída. Esses resultados indicam que o procedimento de requeima contribui para o aumento da pozolanicidade da CBCA.

Nenhuma das amostras com CBCA alcançou 90% de IAP, o que, segundo a NBR 12653 (ABNT, 2014), enquadra as cinzas como materiais não pozolânicos.

Os resultados obtidos para a condutividade elétrica, conforme método proposto por Luxán *et al*. (1989) estão dispostos na Tabela 18:

Tabela 18 - Resultados de condutividade (Luxán)

Solvente	**Variação da Condutividade (mS/cm)**	
	CBCA-M	CBCA-MR

Solução de $Ca(OH)_2$	+2,19	+2,38
Água destilada	+4,06	+3,24

Fonte: o autor (2021).

De Pádua *et al*. (2016) também identificaram aumento da condutividade para o método de Luxán para uma amostra de CBCA. Segundo os autores, nesse procedimento os íons Ca^{2+} podem ser atraídos por algumas partículas finas das cinzas, o que pode prejudicar a reação entre os íons e a sílica amorfa. Vale lembrar que a cinza utilizada por De Pádua *et al*. (2016) continha alto teor de K_2O (33,00%).

Na presente pesquisa, essa pode ser uma explicação para o aumento da condutividade das amostras de CBCA, uma vez que apresentaram percentuais consideráveis de óxidos de potássio (K_2O), além da sílica, conforme resultados obtidos nos ensaios de FRX. Essa tendência de aumento da condutividade também foi verificada por meio da realização do ensaio da CBCA-M e CBCA-MR com água destilada, o que reforça a hipótese de as cinzas liberam outros íons além daqueles provenientes da dissolução do SiO_2.

Portanto, diante da análise da composição química e dos ensaios de condutividade e IAP por desempenho mecânico, a CBCA-M e CBCA-MR são materiais não pozolânicos.

4.4 ARGAMASSAS

4.4.1 Índice de Consistência

A Tabela 19 apresenta os resultados obtidos para o índice de consistência para cada dosagem de argamassa:

Tabela 19 - Resultados do Índice de Consistência

Traço	Índice de consistência (mm)	Média (mm)	Desvio Padrão (mm)	Coef variação (%)
REF	203	199,33	0,321	1,61
	197			
	198			
CM-10	198	195,33	0,251	1,28
	195			
	193			

CM-20	174 180 186	180,00	0,600	3,33
CMR - 10	203 208 199	203,33	0,450	2,21
CMR - 20	189 189 186	188,00	0,173	0,92

Fonte: o autor (2021).

Com base na Tabela 19, nota-se que as argamassas com apenas 10% de percentual de substituição não apresentaram diferenças significativas no índice de consistência em relação à referência, sendo que os traços CM-10 e CMR-10 obtiveram espalhamentos, respectivamente, 2,00% inferior e 2,00% superior em relação à argamassa referência. A Tabela 20 apresenta a análise de variância dos resultados, conforme método ANOVA Fator Único entre grupos e erro de 5%.

Tabela 20 - Análise estatística dos resultados de Índice de Consistência

Fonte de variação	**Amostras**	**SQ**	**gl**	**MQ**	**F**	**valor-P**	**F crítico**	**Avaliação**
Entre grupos	REF, CM10 e CMR 10	576,06	2	48	3,891	0,08247	5,143	Estatisticamente semelhantes
	REF, CM 10, CM20, CMR10 e CMR20	234,10	4	259,6	17,078	0,00018	3,478	Estatisticamente diferentes

Fonte: autor, 2021.

A análise de variância indica que os valores obtidos por REF, CM 10 e CMR 10 são estatisticamente semelhantes, o que reforça a constatação de que a introdução de apenas 10% de CBCA não modificou significativamente o índice de consistência das argamassas. Já para as cinco dosagens, a análise de variância exibe os resultados como estatisticamente diferentes, o que indica que as dosagens com 20% de CBCA trouxeram resultados significativamente diferentes em relação aos demais traços.

Já as dosagens CM-20 e CMR-20 registraram quedas significativas no índice de consistência, apresentando, respectivamente, valores 9,69% e 5,68% inferiores à argamassa de referência. Estes resultados indicam que o aumento do percentual de

substituição do cimento pela CBCA contribuiu para a queda da trabalhabilidade das argamassas. Bezerra *et al*. (2017) já haviam identificado que a introdução da CBCA como substituição parcial ao cimento produz argamassas com menor trabalhabilidade.

Foi observado também que a introdução da CBCA-M provocou maior redução da trabalhabilidade do que a incorporação da CBCA-MR. Uma possível explicação para esse fato é que o processo de requeima produziu cinzas mais homogêneas, conforme verificado durante os ensaios de microscopia eletrônica de varredura. Essa maior homogeneidade pode indicar que a CBCA-M apresenta partículas mais irregulares e maior superfície de contato disponível, o que aumentaria a quantidade de água absorvida durante a confecção da argamassa.

4.4.2 Resistência à Compressão

A Tabela 21 exibe os resultados adquiridos pelas argamassas para os ensaios de compressão e o percentual para cada idade em relação à argamassa referência.

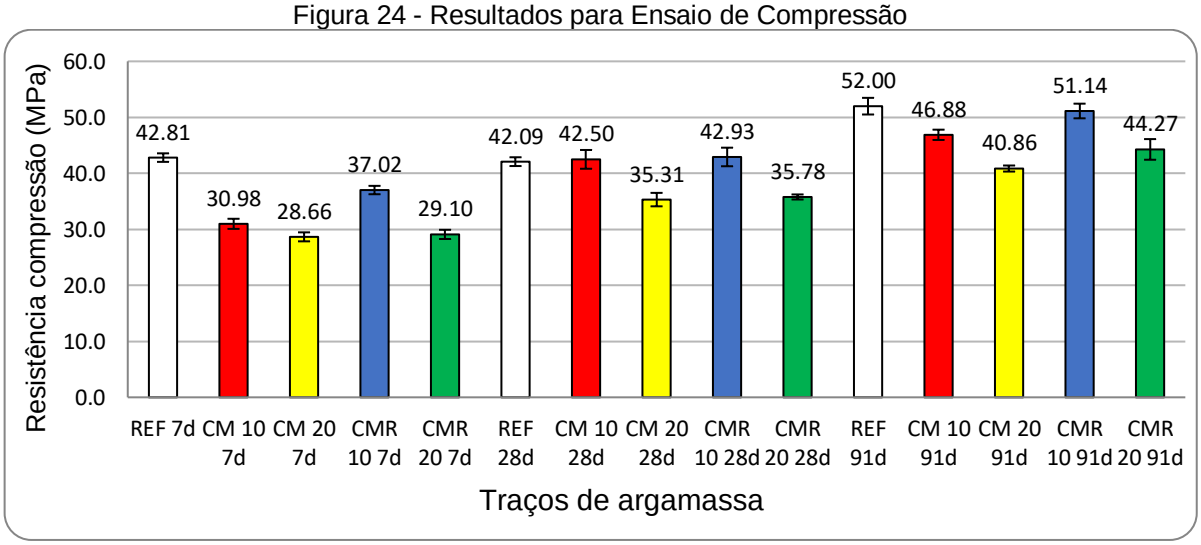
Tabela 21 - Resultados para Ensaios de Compressão

Dosagem	**Idade (dias)**	**Resistência à compressão (MPa)**				**Média (MPa)**	**Desvio padrão (MPa)**	**Variância (%)**	**Percentual em relação a Referência (%)**
		CP 1	CP 2	CP 3	CP 4				
Referência	7	43,19	43,70	42,10	42,26	42,81	0,762	0,581	100%
	28	43,08	41,97	41,17	42,13	42,09	0,783	0,614	100%
	91	50,10	51,58	53,46	52,84	52,00	1,485	2,207	100%
CM 10	7	34,36*	32,01	30,63	30,31	30,98	1,842	3,394	74,35%
	28	42,8	42,13	40,5	44,55	42,50	1,676	2,809	100,97%
	91	48,13	46,02	46,96	46,4	46,88	0,919	0,846	90,15%
CM 20	7	28,4	28,1	29,85	28,28	28,66	0,804	0,647	66,94%
	28	34,94	36,7	33,87	35,74	35,31	1,201	1,442	83,89%
	91	40,82	41,56	40,81	40,24	40,86	0,541	0,292	78,57%
CMR 10	7	36,78	36,09	37,81	37,39	37,02	0,749	0,561	86,47%
	28	42,5	45,34	42,28	41,58	42,93	1,657	2,745	101,99%
	91	50,36	50,13	53,01	51,04	51,14	1,308	1,711	98,34%
CMR 20	7	28,85	28,87	28,38	30,28	29,10	0,821	0,675	67,97%
	28	35,32	36,11	36,22	35,47	35,78	0,450	0,203	85,00%
	91	43,31	44,42	42,57	46,79	44,27	1,842	3,394	85,13%
*valor eliminado por apresentar desvio superior a 6% em relação à média.									

Fonte: o autor, 2021.

A Figura 24 apresenta graficamente os valores de resistência à compressão obtidos pelas argamassas aos 7, 28 e 91 dias.

Figura 24 - Resultados para Ensaio de Compressão



Fonte: o autor, 2021.

A Tabela 22 apresenta os resultados para a análise estatística dos resultados, agrupados em idades:

Tabela 22 - Análise estatística dos resultados de resistência à compressão

Fonte de variação	Idade	SQ	gl	MQ	F	valor-P	F crítico	Avaliação
Entre grupos	7 dias	576,06	4	144,01	122,89	2,842E-11	3,055	Estatisticamente diferentes
	28 dias	234,10	4	58,52	37,44	1,222E-07	3,055	Estatisticamente diferentes
	91 dias	348,91	4	87,22	51,59	1,364E-08	3,055	Estatisticamente diferentes

Fonte: o autor, 2021.

Nota-se que para todas as idades, os traços de argamassas apresentaram resultados estatisticamente diferentes entre si, conforme a análise de variância ANOVA.

A comparação dos valores de compressão aos 7 dias (Tabela 21 e Figura 24), evidencia que as amostras com adição de CBCA-M ou CBCA-MR registraram resistência significativamente inferior à argamassa com 100% de cimento, sendo que as dosagens CM 10, CM 20 e CMR 20 obtiveram, respectivamente, resistência à compressão 25,65%, 33,06% e 32,03% inferiores ao valor obtido pela referência. O traço CMR 10 exibiu a menor queda (13,53%) em relação à referência.

Conforme pode ser observado na Figura 24, essa inferioridade da resistência das amostras com cinzas em relação à referência foi mais acentuada para idades

precoces (7 dias), o que indica que a cinética de hidratação e ganho de resistência das argamassas com CBCA é mais lenta quando comparada à argamassa com 100% de cimento Portland. Essa constatação é coerente com os resultados obtidos nos ensaios de tempos de pega, nos quais todas as pastas com adição de cinzas registraram retardos significativos nos tempos de fim de pega e na cinética de hidratação, quando comparadas à pasta de referência. Essa correlação também foi identificada na pesquisa de Cordeiro, Barroso e Toledo Filho (2017).

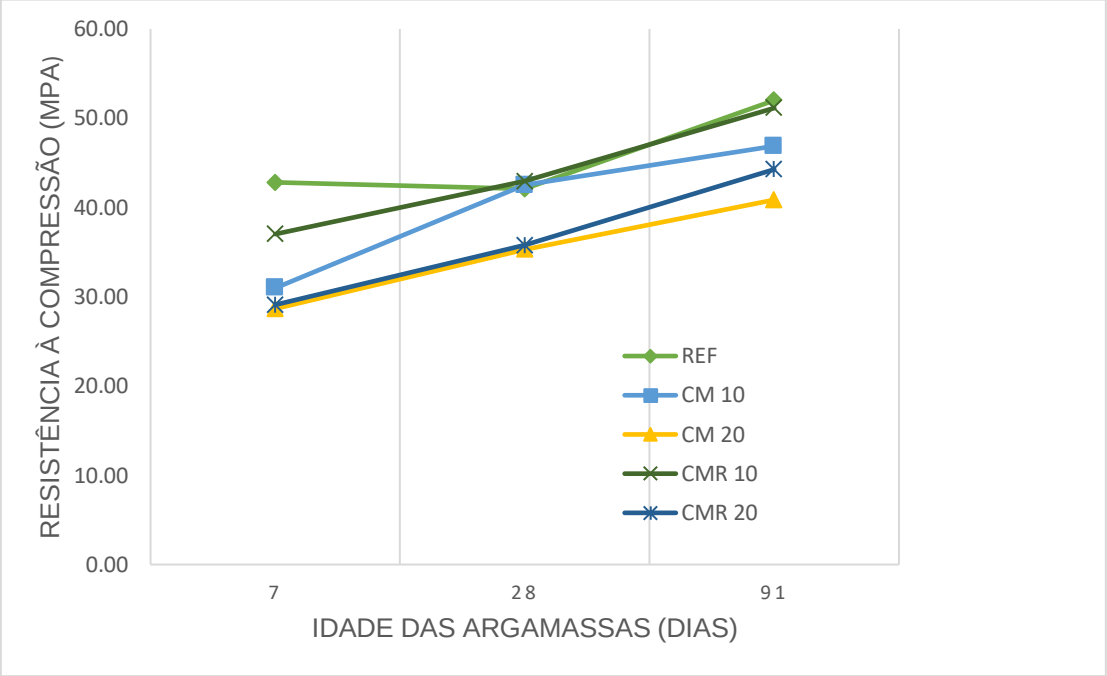
Com relação à resistência à compressão aos 28 dias, as argamassas CM 20 e CMR 20 registraram, respectivamente, resultados 16,11% e 15% inferiores em relação à referência. Nota-se, portanto, que a diferença da resistência dessas argamassas em relação à dosagem com 100% de cimento, foi mais acentuada para 7 dias do que para 28 dias de idade. Já as dosagens CM 10 e CMR 10 obtiveram valores de resistência à compressão aos 28 dias de idade similares à dosagem de referência, sendo que CM 10 e CMR 10 registraram acréscimos de 0,97% e 1,99% da resistência, em relação à argamassa sem adição de cinzas.

A NBR 16697 (ABNT, 2018) contém os requisitos mecânicos exigidos para cada classe de cimento e o cimento com introdução de CBCA pode ser enquadrado como CP II – Z, ou seja, com adição de pozolanas. Comparando-se os resultados para compressão para 7 e 28 dias com os limites estabelecidos pela referida Norma, nota-se que as dosagens CM 20 e CMR 20 apresentam desempenho satisfatório para o CP II – Z 32 e os traços CMR 10 e CMR 20 obtiveram desempenho equivalente ao de um CP II-Z 40.

Os resultados das amostras para os 91 dias de idade demonstram que os traços CM 10, CM 20 e CMR 20 obtiveram valores de resistência inferiores, respectivamente, em 9,85%, 21,43% e 14,87% em relação à argamassa referência. Já a argamassa CMR 10 apresentou resistência à compressão similar à referência, registrando uma queda de apenas 1,66%.

A Figura 25 exibe a evolução da resistência à compressão das argamassas com o passar do tempo:

Figura 25 - Evolução da resistência à compressão com o tempo



Fonte: o autor, 2021.

A Figura 25 ilustra que o ganho de resistência ao longo prazo foi mais significativo para as amostras com a CBCA-MR do que para as dosagens com CBCA-M. O acréscimo de resistência de 28 dias para 91 dias para CMR 10 e CMR 20 foi, respectivamente, 19,12% e 23,72%, ao tempo que para os traços CM 10 e CM 20, o acréscimo de resistência para o mesmo período foi, respectivamente, 10,30% e 15,71%.

Diante dos resultados, nota-se que dentre as argamassas com adição da cinza, a dosagem com 10% de CBCA moída e requeimada (CMR 10) apresentou os melhores resultados de resistência à compressão para todas as idades. Além disso, para as idades de 28 e 91 dias, o traço CMR 10 apresentou resistência similar à argamassa de referência. Resultados semelhantes já haviam sido identificados nos estudos de Ganesan, Rajagopal e Thangavel (2007), Ribeiro e Morelli (2014) e Jagadesh *et al.* (2019), nos quais argamassas com 10% de introdução de CBCA obtiveram comportamento mecânico satisfatório. Portanto, diante da perspectiva da resistência à compressão, o percentual mais adequado de substituição parcial do cimento pela CBCA-MR é de 10% (em volume).

4.4.3 Resistência à Tração por Compressão Diametral

A Tabela 23 exibe os resultados obtidos pelas argamassas para o ensaio de tração por compressão diametral.

Tabela 23 - Resultados para ensaios de tração

Argamassa	**Resistência à Tração por Compressão Diametral (Mpa)**				**Média (MPa)**	**Desvio padrão (MPa)**	**Coef. Variação**	**Percentual em relação à referência**
	CP 1	CP 2	CP 3	CP 4				
Referência 28d	3,266	2,555	2,658	2,655	2,78	0,325	11,68 %	100 %
CM 10 28d	3,594	2,653	2,338	2,340	2,73	0,593	21,74 %	98,12 %
CM 20 28d	3,626	3,416	3,434	4,046	3,63	0,292	8,06 %	130,42 %
CMR 10 28d	2,946	2,929	3,174	3,505	3,14	0,268	8,56 %	112,75 %
CMR 20 28d	2,881	3,135	3,354	2,702	3,02	0,285	9,47 %	108,42 %

Fonte: o autor, 2021.

A análise estatística se deu através do método ANOVA Fator Único, disponibilizado pelo Microsoft Excel, no qual realiza-se uma comparação das variâncias considerando um erro admissível de 5%. A Tabela 24 apresenta os resultados da análise estatística.

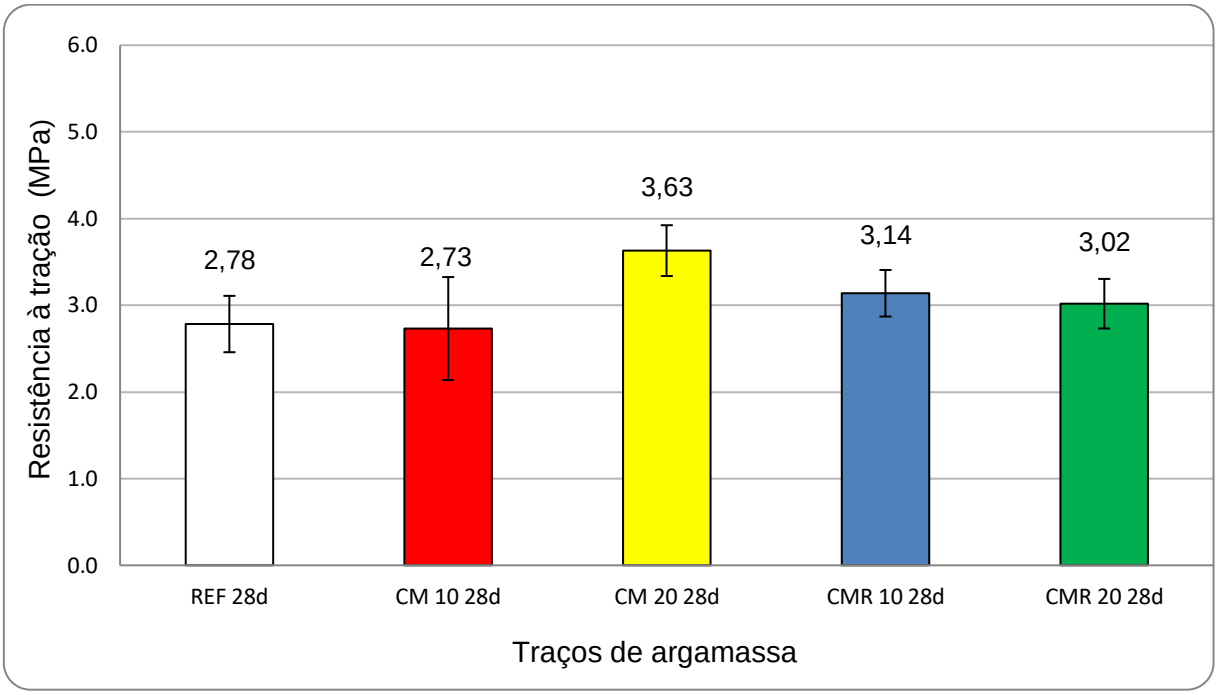
Tabela 24 - Análise estatística dos resultados de resistência à tração

Fonte de variação	SQ	gl	MQ	F	valor-P	F crítico	Avaliação
Entre grupos	2,0717	4	0,5179	3,709	0,0272	3,055	Estatisticamente diferentes

Fonte: o autor, 2021.

A Figura 26 apresenta o gráfico dos resultados obtidos para cada traço, para o ensaio de tração por compressão diametral:

Figura 26 - Resultados para ensaio de tração por compressão diametral.



Fonte: o autor (2021).

Com base nas Tabela 23 e Tabela 24 e Figura 26, constata-se que os resultados para a resistência à tração por compressão diametral foram considerados estatisticamente diferentes, conforme análise de variância, pois o valor F foi superior a $F_{crítico}$. Ademais, os traços CM-20, CMR 10 e CMR 20 obtiveram, respectivamente, resistências 30,42%, 12,75% e 8,42% superiores à argamassa referência. A dosagem CM 10 apresentou resistência à tração muito semelhante à referência, porém, exibiu coeficiente de variação consideravelmente elevado (21,74%).

Com base na análise estatística, pode-se afirmar que introdução das cinzas não prejudicou os valores de resistência à tração das argamassas. Resultados semelhantes foram identificados por Berenguer *et al*. (2020), que por sua vez identificaram que a introdução da até 15% de CBCA não prejudica essa propriedade mecânica das argamassas.

4.4.4 Índice de Absorção por Imersão

A Tabela 25 exibe os resultados obtidos pelos traços de argamassas para os ensaios de Índice de Absorção.

Tabela 25 - Resultados para Índice de Absorção

Argamassa	Índice Absorção (%)		
	Unidade	Média	Desv Pad
Referência	5,68	5,613	0,0947

	5,55		
CM 10	6,65	6,425	0,318
	6,20		
CM 20	7,51	7,449	0,0933
	7,38		
CMR 10	7,25	7,143	0,145
	7,04		
CMR 20	7,59	7,545	0,063
	7,50		

Fonte: o autor, 2021.

Diante dos resultados, constata-se que as argamassas com CBCA-M e CBCA-MR registraram médias de índices de absorção mais elevadas do que a referência. Os traços CM-10, CM-20, CMR-10 e CMR-20 apresentaram aumento de 14,46%, 32,70%, 27,25% e 34,42% em relação ao traço sem adição de cinza. Nota-se que o aumento do percentual de CBCA elevou o índice de absorção das amostras.

Bezerra *et al*. (2017) constataram que a adição da CBCA moída e requeimada contribuiu para a redução do índice de absorção das argamassas, o que, segundo os autores, indica uma redução da porosidade aberta das amostras. Entretanto, é importante ressaltar que a cinza utilizada por esses autores apresentou distribuição granulométrica mais fina do que o cimento, o que favorece a ocorrência do efeito fíler e seu consequente refinamento dos poros.

Paula *et al*. (2009) verificaram que a adição de CBCA moída e requeimada contribuiu para a elevação do índice de absorção das argamassas e, assim como no presente estudo, as cinzas continham maior diâmetro médio do que o cimento Portland utilizado. Este fato indica que a incorporação de CBCA com granulometria mais grossa do que o cimento tende a produzir argamassas com maior porosidade aberta à água.

5 CONCLUSÕES

O procedimento de moagem gera cinzas mais homogêneas, fato averiguado através da análise de MEV, no qual a CBCA-M exibiu maior homogeneidade na morfologia e fibras menores quando comparada à CBCA *in natura*.

A requeima a 600ºC produziu cinzas com maior homogeneidade diante do aspecto da granulometria, o que foi constatado a partir do ensaio granulometria a laser para CBCA-M e CBCA-MR. Além disso, a requeima reduziu a quantidade de matéria orgânica das cinzas, uma vez que a perda ao fogo registrada pela CBCA-MR foi 43,02% inferior ao valor obtido por CBCA-M.

A composição de óxidos evidenciou para a cinza *in natura*, CBCA-M e CBCA-MR que, embora o percentual de SiO_2 tenha prevalecido, a cinza do bagaço proveniente da produção de cachaça artesanal apresentou considerável teor de K_2O. A presença de compostos ricos em potássio provavelmente se deve ao uso de fertilizantes tipo NPK. Este fato merece atenção, pois a presença desse composto favorece a ocorrência da reação álcali-agregado (RAA) em materiais cimentícios, fator desfavorável à durabilidade dos materiais. Portanto, o estudo das RAAs de materiais cimentícios com adição de CBCA originária da produção da cachaça artesanal é uma sugestão para trabalhos futuros.

A introdução das cinzas não acarretou alterações significativas (inferiores a 3% em relação à referência) nos tempos de início de pega das pastas, porém, geraram retardos relevantes (superiores a 7% em relação à referência) nos tempos de fim de pega das amostras. A exceção ficou por conta da pasta com 20% de CBCA-M, que obteve tempos maiores tanto para início quanto fim de pega. Os resultados para o fim de pega evidenciam que a adição das cinzas gera retardo na cinética de hidratação dos materiais cimentícios. Essa constatação está coerente com os resultados de compressão inferiores obtidos pelas argamassas com adição de CBCA para idades precoces (7 dias), quando comparadas à referência. Esse retardo da hidratação se deve à presença de carbono nas cinzas, sendo que a pasta com 20% de CBCA-M apresentou tempos de pega muito superiores à pasta com 20% de CBCA-MR. Tal constatação evidencia que o processo de requeima da CBCA a 600ºC reduz a quantidade de carbono das cinzas e acelera a hidratação das pastas e argamassas.

Com relação à atividade pozolânica, os requisitos químicos, os ensaios de Índice de Atividade Pozolânica (IAP) e de condutividade são coerentes entre si, tendo em vista que os três métodos enquadraram a CBCA-M e CBCA-MR como materiais não pozolânicos. Porém, vale ressaltar que, conforme o método IAP, a CBCA-MR apresentou índice de pozolanicidade 12,88% superior em relação à CBCA-M, o que indica que a requeima a 600ºC contribui para o aumento da pozolanicidade das cinzas.

Para as argamassas no estado fresco, foi identificado que introdução das cinzas até o teor de 10% não acarretou mudanças significativas para o índice de consistência. Por outro lado, argamassas com 20% de CBCA apresentaram trabalhabilidade significativamente inferior em relação à referência.

De maneira geral, a adição da CBCA-M e CBCA-MR não prejudicou o desempenho para a resistência à tração das argamassas para percentuais de até 20% de substituição.

Com relação à resistência à compressão, conclui-se que as argamassas com CBCA apresentam maior ganho de resistência ao longo prazo. As argamassas com 10% de adição da cinza moída e requeimada (CMR 10) apresentaram o melhor desempenho mecânico dentre as dosagens com CBCA, sendo que essa dosagem obteve valores de compressão semelhantes à referência para os 28 e 91 dias de idade. Portanto, diante da perspectiva do desempenho mecânico, a dosagem com 10% de CBCA-MR apresentou-se como a alternativa mais viável.

Diante da perspectiva do desempenho mecânico, as dosagens CM 20 e CMR 20 podem ser enquadradas como CP II-Z 32 e as dosagens CMR 10 e CM 10 apresentaram desempenho de cimento CP II-Z 40, conforme limites estabelecidos pela NBR 16697 (ABNT, 2018).

A adição de cinzas com granulometria mais grossa do que o cimento Portland produz argamassas com maiores índices de absorção e, logo, com maior porosidade aberta. Para estudos futuros, sugere-se a aplicação de uma moagem em moinho de bolas por mais tempo ou a adoção de uma tecnologia de moagem que possa produzir amostras de CBCA mais finas.

Embora a CBCA-MR tenha exibido uma distribuição granulométrica mais fina do que a CBCA-M, essa maior finura não foi suficiente para gerar um melhor empacotamento das argamassas produzidas com CBCA-MR em relação às

argamassas com CBCA-M, tendo em vista que ambas apresentaram índices de absorção semelhantes. Esta constatação indica que a melhor resistência à compressão obtida pelas argamassas com CBCA-MR em relação às amostras com CBCA-M se deve, principalmente, ao menor teor de carbono presente na cinza requeimada, o que favoreceu o processo de hidratação do material e a ocorrência, mesmo que em pequena escala, de reações pozolânicas.

A utilização da CBCA proveniente da produção da cachaça artesanal como substituição parcial ao cimento é viável, uma vez que essa prática traz consigo dois ganhos ambientais: a redução do consumo do cimento Portland e do clínquer, o que reduz a pegada de carbono da indústria do cimento, e o reaproveitamento de um resíduo da indústria da cachaça, a cinza do bagaço de cana-de-açúcar.

Este estudo traz consigo uma relevante novidade: a reutilização de CBCA originária da produção da cachaça artesanal, ao tempo que grande parte da literatura avalia o reaproveitamento de CBCA oriunda de indústrias de álcool ou açúcar.

Para trabalhos futuros, sugere-se o estudo das propriedades de durabilidade de argamassas produzidas com a substituição parcial do cimento pela CBCA oriunda da produção da cachaça artesanal.

6 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABCP – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE CIMENTO PORTLAND. Relatório Anual. 2012.

ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5751: Materiais pozolânicos – Determinação da atividade pozolânica com cal aos sete dias.** Rio de Janeiro, 2015. 4 p.

ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5752: Materiais pozolânicos – Determinação da atividade pozolânica com cimento Portland.** Rio de Janeiro, 2014. 4 p.

____. **NBR 7215: Cimento Portland - Determinação da resistência à compressão de corpos de prova cilíndricos.** Rio de Janeiro, 2019. 12 p.

____. **NBR. 7222: Concreto e argamassa-Determinação da resistência à tração por compressão diametral de corpos-de-prova cilíndricos.** Rio de Janeiro: ABNT, 2011. 5 p.

____. **NBR 9778: Argamassa e concreto endurecido – Determinação da absorção de água, índice de vazios e massa específica**. Rio de Janeiro, 2005. 4 p.

____. **NBR 12653: Materiais pozolânicos – Requisitos.**Rio de Janeiro, 2014. 6 p.

____. **NBR 13276: Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos - Determinação do índice de consistência.** Rio de Janeiro, 2016. 2 p.

____. **NBR 15985: Materiais pozolânicos-Determinação do teor de cálcio fixado-Método ChapelleModificado.**Rio de Janeiro, 2010. 6 p.

____. **NBR 16605: Cimento Portland e outros materiais em pó – Determinação da massa específica.**Rio de Janeiro, 2017. 4 p.

____. **NBR 16606: Cimento Portland – determinação da pasta de consistência normal.** Rio de Janeiro, 2018. 8 p.

____. **NBR 16607: Cimento Portland – determinação dos tempos de pega.** Rio de Janeiro, 2018. 4p.

____. **NBR 16697: Cimento Portland – requisitos.** Rio de Janeiro, 2018. 12p.

____. **NBR NM 18. Cimento Portland - Análise química - Determinação de perda ao fogo.** Rio de Janeiro, 2012. 4 p.

AGEITEC. Agência Embrapa de Informação e Tecnologia. Disponível em: <https://www.agencia.cnptia.embrapa.br/gestor/cana-de-acucar/arvore/CONT000fiog1ob502wyiv80z4s473agi63ul.html>. Acesso em: 02/01/2021.

BATISTA, A. D. B. Efeitos de resíduos agroindustriais na resistência mecânica, porosidade e permeabilidade de argamassas e concretos. **Dissertação de Mestrado - CEFET-MG - Departamento de engenharia Civil**, p. 117, 2016.

BERENGUER, R. A. *et al.*Sugarcane bagasse ash as a partial substitute of Portland cement: Effect on mechanical properties and emission of carbon dioxide. **Journal of Environmental Chemical Engineering**. V. 8, 7 p., 2020.

BERNAL, C. et al. Influência de alguns parâmetros experimentais nos resultados de análises calorimétricas diferenciais - DSC. **Química Nova**, v. 25, n. 5, p. 849–855, set. 2002.

BERODIER, E.; SCRIVENER, K. Understanding the Filler Effect on the Nucleation and Growth of C-S-H. **Journal of the American Ceramic Society**, v. 97, n. 12, p. 3764–3773, dez. 2014.

BEZERRA, A. C. DA S. et al. Effect of partial replacement with thermally processed sugar cane bagasse on the properties of mortars. **Revista Materia**, v. 22, n. 1, 2017.

BULLARD, J. W. et al. Mechanisms of cement hydration. **Cement and Concrete Research**, v. 41, n. 12, p. 1208–1223, dez. 2011.

CALLISTER, J. R. **Ciência e engenharia de materiais: uma introdução**. [s.l: s.n.].

CARDOSO, M. G. **Produção de aguardente de cana.** 3. ed. Lavras: [s.n.].

COELHO, S. T. **Mecanismos para implementação da co-geração de eletricidade a partir de biomassa. Um modelo para o Estado de São Paulo.** [s.l.] Universidade de São Paulo - USP, 1999.

COOK, D. Rice husk ash concrete technology and design, cement replacement materials. In: **London: Surrey University Press**. [s.l: s.n.]. p. 171–196.

CORDEIRO, G. C. **Utilização de cinzas ultrafinas do bagaço de cana-de-açúcar e da casca de arroz como aditivos minerais em concretos.** [s.l.] Universidade Federal do Rio de Janeiro - UFRJ, 2006.

CORDEIRO, G. C.; ANDREÃO, P. V.; TAVARES, L. M. Pozzolanic properties of ultrafine sugar cane bagasse ash produced by controlled burning. **Heliyon**, v. 5, n. 10, 1 out. 2019.

CORDEIRO, G. C.; BARROSO, T. R.; TOLEDO FILHO, R. D. Enhancement the Properties of Sugar Cane Bagasse Ash with High Carbon Content by a Controlled Re-calcination Process. **KSCE Journal of Civil Engineering**, v. 22, n. 4, p. 1250-1257, 2017.

CORDEIRO, G. C.; DÉSIR, J. M. Potencial de argila caulinítica de Campos dos Goytacazes, RJ, na produção de pozolana para concreto de alta resistência. **Cerâmica**, v. 56, n. 337, p. 71–76, 2010.

CORDEIRO, G. C.; KURTIS, K. E. Effect of mechanical processing on sugar cane bagasse ash pozzolanicity. **Cement and Concrete Research**, v. 97, p. 41–49, jul. 2017.

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. **Química Nova**,v. 32, n. 1, p. 82-86, 2009.

DAL MOLIN, D. C. C. **Contribuição ao estudo das propriedades mecânicas dos concretos de alta resistência com e sem adições de microssílica.**[s.l.] Universidade de São Paulo - USP, 1995.

DE PÁDUA, P. G. L.; PANZERA, T. H.; FIGUEIREDO, R. B.; GOMES, A. M.; AGUILAR, M. T. P. Investigations on the Pozzolanic Effect of Sugar Cane Bagasse Ashes Used in Cementitious Composites.**The Open Construction and Building Technology Journal.** v. 10, p. 395-405, nov, 2015.

DE PADUA, P. G. L. **Desempenho de compósitos cimentícios fabricados com cimentos aditivados com cinzas de bagaço-de-cana in natura e beneficiadas.** [s.l.] Universidade Federal de Minas Gerais - UFMG, 2012.

FACHINI, D. Aglomerante alternativo para construção civil, **Dissertação de Mestrado - Programa de Pós-graduação em Engenharia Mecânica e de Materiais, Universidade Tecnológica Federal do Paraná**, Curitiba, 2010.

FAIRBAIRN, E. M. R. et al. Numerical simulation of dam construction using low-CO2-emission concrete. **Materials and Structures/Materiaux et Constructions**, v. 43, n. 8, p. 1061–1074, out. 2010.

FELICETTI, M. R.; CLARET, A. M.; SILVA, M. V. M. M. S.; CASTRO, L. W. A.;

AGUILAR, M. T. P.; RODRIGUES, C. S.; BEZERRA, A. C. S. Compósitos Cimentícios Sustentátiveis com Cinzas de Bagaço de Cana-de-açúcar: Portencial de Redução de Emissões de CO2. **Revista SODEBRAS**, v. 9, p. 13-23, 2014.

FELICETTI, M. R. Uso de cinza de bagaço de cana-de-açúcar em cimento Portland como mecanismo de desenvolvimento limpo.**Tese de Doutorado. Universidade Federal de Ouro Preto**, 2016.

FERREIRA, R. T. L. et al. Influence of Reburning on the Pozolanicity of Sugar-Cane Bagasse Ashes with Different Characteristics. **Materials Science Forum**, v. 869, p. 141–146, ago. 2016.

FIEMG. **Guia de Sustentabilidade na Construção.** Belo Horizonte: [s.n.].

FIESP. SAO PAULO/CENTRO DAS INDÚSTRIAS DO ESTADO DE SAO PAULO-FIESP/CIESP. Ampliação da oferta de energia através da biomassa (bagaço da cana-de-açúcar). São Paulo: FIESP/CIESP, p. 37-54, 2001.

FONSECA, G. C. Adições minerais e as disposições normativas relativas à produção de concreto no Brasil. **Dissertação de Mestrado - Programa de Pós-graduação em Construção Civil, Universidade Federal de Minas Gerais - UFMG.**, p. 105, 2010.

FREITAS, F. A. E. Microfissuração e evolução da hidratação de concretos de cimento Portland, com e sem adição de escória, por meio de análise de imagens.**Dissertação Mestrado – Faculdade de Engenharia Civil, Unicamp**, 2001.

FREITAS, E. S. Caracterização da cinza do bagaço de cana-de-açúcar do município de Campos de Goytacazes para uso na construção civil. **Dissertação de Mestrado, Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro.**, p. 97, 2005.

FRÍAS, M.; VILLAR, E.; SAVASTANO, H. Brazilian sugar cane bagasse ashes from the cogeneration industry as active pozzolans for cement manufacture. **Cement and Concrete Composites**, v. 33, n. 4, p. 490–496, abr. 2011.

GANESAN, K.; RAJAGOPAL, K.; THANGAVEL, K. Evaluation of bagasse ash as supplementary cementitious material. **Cement and Concrete Composites**, v. 29, n. 6, p. 515–524, jul. 2007.

HUANG, L. et al. Carbon emission of global construction sector. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 81, p. 1906–1916, jan. 2018.

IBRAC. Instituto Brasildeiro da Cachaça. **Mercado Interno**. Disponível em

<https://ibrac.net/servicos/mercado-interno> Acesso em < 15 mar. 2021.

JAGADESH, P. *et al*. Adaptability of Sugar Cane Bagasse Ash in Mortar. **Journal of The Institution of Engineers (India): Series A**, v. 100, p. 225-240, 2019.

LAMEZON DE PÁDUA, P. G. et al. Investigations on the Pozzolanic Effect of Sugar Cane Bagasse Ashes Used in Cementitious Composites. **The Open Construction and Building Technology Journal**, v. 10, n. 1, p. 395–405, 28 jun. 2016.

LUXÁN, M. P.; MADRUGA, F.; SAAVEDRA, J. Rapid evaluation of pozzolanic activity of natural products by conductivity measurement. **Cement and Concrete Research**, v. 19, n. 1, p. 63–68, jan. 1989.

MANSANEIRA, E. C.; SCHWANTES-CEZARIO, N.; BARRETO-SANDOVAL, G. F.; MARTINS-TORALLES, B. Sugar cane bagasse ash as a pozzolanic material. **DYNA** 84(201), pp. 163-171, jun. 2017.

MASSAZA, F. Pozzolana and pozzolanic cements. In: **Lea's chemistry of cement and concrete**. 4. ed. Nova Iorque: [s.n.]. p. 471–631.

MAUÉS, J. A. Maximização da geração elétrica a partir do bagaço e palha em usina de açúcar e álcool. **Revista Engenharia**, p. 88–95, 2007.

MEHTA, P. K.; MONTEIRO, P. J. M. **Concreto: Microestrutura, Propriedades e Materiais**. 2 ed ed. São Paulo: [s.n.].

MORAES NETO, B. D. DE. Comportamento à punção de lajes lisas em concreto reforçado com fibras de aço sob carregamento simétrico. **Tese de Doutorado em Estruturas e Construção Civil — Universidade de Brasília**, p. 343, 2013.

MOREIRA, J. R.; GOLDEMBERG, J. The alcohol program. **Energy Policy**, v. 27, n. 4, p. 229–245, abr. 1999.

NEVILLE, A. M. **Propriedades do concreto**. 2 ed ed. São Paulo: PINI, 1997.

NITA, C.; JOHN, V. Materiais pozolânicos: o metacaulim e a sílica ativa. **Boletim Técnico da Escola Politécnica da USP. Departamento de Engenharia de Construção Civil**, p. 8–9, 2007.

PAULA, M. O. Potencial da cinza do bagaço de cana-de-açúcar como material de substituição parcial de cimento Portland. **Programa de Pós Graduação em Engenharia Agrícola. Dissertação de mestrado - Universidade Federal de Viçosa.**, p. 77, 2006.

PAULA, M. O. *et al*. Potencial da cinza do bagaço da cana-de-açúcar como materialde substituição parcial de cimento Portland. **Revista Brasileira deEngenharia Agrícola e Ambiental**, v.13, n.3, p.353–357, 2009.

PAYÁ, J. et al. Sugar-cane bagasse ash (SCBA): studies on its properties for reusing in concrete production. **Journal of Chemical Technology & Biotechnology**, v. 77, n. 3, p. 321–325, mar. 2002.

POGGIALI, F. S. J. Desempenho de microconcretos fabricados com cimento Portland com adições de cinza de bagaço de cana-de-açúcar. **Dissertação de Mestrado - Programa de Pós Graduação em Construção Civil da Universidade Federal de Minas Gerais**, p. 150, 2010.

RAMACHANDRAN, V. S. et al. **Handbook of thermal analysis of construction materials.** [s.l: s.n.].

RIBEIRO, D. V.; MORELLI, M. R. Effect of calcination temperature on the pozzolanic activity of Brazilian sugar cane bagasse ash (SCBA). **Materials Research**, v. 17, n. 4, p. 974–981, 1 jul. 2014.

ROLPH, G. M. **Something about Sugar: Its History, Growth, Manufacture and Distribution.**[s.l.] J. J. Newbegin, 1917.

SANTOS, S. Produção e Avaliação do uso de pozolana com baixo teor de carbono obtida da cinza de casca de arroz residual para concreto de alto desempenho. **Tese de doutorado. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal de Santa Catarina.**, p. 267, 2006.

SANTOS, S. B. Análise da fluência do concreto massa nas primeiras idades: influência de aditivos plastificantes e adições minerais. **Tese de doutorado. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal do Rio Grande do Sul.**, p. 262, 2011.

SCRIVENER, K. L. et al. TC 238-SCM: hydration and microstructure of concrete with SCMs. **Materials and Structures**, v. 48, n. 4, p. 835–862, 5 abr. 2015.

SCRIVENER, K. L.; JOHN, V. M.; GARTNER, E. M. Eco-efficient cements: Potential economically viable solutions for a low-CO2 cement-based materials industry. **Cement and Concrete Research**, v. 114, p. 2–26, dez. 2018.

SNIC. Sindicato Nacional de Cimento Portland. Relatório Anual, 2019. Disponível em: <http://snic.org.br/assets/pdf/relatorio_anual/rel_anual_2019.pdf>

SOARES, M. M. N. S. Influência das condições de queima nas características físico-químicas das cinzas do bagaço de cana-de-açúcar. **Dissertação de mestrado. Programa de Pós Graduação em Construção Civil - Universidade Federal de Minas Gerais.**, p. 116, 2010.

TAYLOR, H. F. **Cement chemistry**. [s.l.] Thomas Telford, 1997.

TIBONI, R. A. Utilização da Cinza da Casca de Arroz de Termoelétrica Como Componente do Aglomerante de Compósitos à Base de Cimento Portland. **Dissertação de Mestrado - Escola de Engenharia de São Carlos Universidade de São Paulo.**, p. 179, 2007.

TOMMASELLI, M. A. G. et al. **Alternativa de utilização sustentável do resíduo cinza, oriunda da queima do bagaço da cana-de-açúcar, incorporando-a ao concreto como agregado.** XXXI Encontro Nacional de Engenharia de Produção (ENEGEP). **Anais**.Belo Horizonte: 2011

TORRES, S. M. Aplicação da Difração de Raios X na Análise do Potencial Pozolânico da Cinza do Bagaço da Cana-de-açúcar para Adição ao Cimento Portland. **Dissertação de Mestrado - Programa de Pós Graduação em engenharia Civil - Universidade Federal de Pernambuco**, p.101, 2019.

UNICA. **Relatório Atividades 2012/12 a 2018/19. 2019.** Disponível em: <https://unica.com.br/comunicacao/publicacoes/>. Acesso em: 20 ago. 2020.