**UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS**
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CONSTRUÇÃO CIVIL

Mateus Bravo de Aguiar

# INFLUÊNCIA DA CINZA DO BAGAÇO DE CANA-DE-AÇÚCAR NA MICROESTRUTURA DE COMPOSTOS CIMENTÍCIOS COM CURA EM AUTOCLAVE

Belo Horizonte
2024

Mateus Bravo de Aguiar

# INFLUÊNCIA DA CINZA DO BAGAÇO DE CANA-DE-AÇÚCAR NA MICROESTRUTURA DE COMPOSTOS CIMENTÍCIOS COM CURA EM AUTOCLAVE

Dissertação apresentada à Escola de Engenharia da Universidade Federal de Minas Gerais como parte dos requisitos para obtenção do título de Mestre em Construção Civil. Área de concentração: Tecnologia na Construção Civil. Linha de pesquisa: Materiais de Construção Civil.

Orientadora:Dra. Dayana Cristina Silva Garcia

Belo Horizonte

2024

A282i

Aguiar, Mateus Bravo de.
influência da cinza do bagaço de cana-de-açúcar na microestrutura de compostos cimentícios com cura em autoclave [recurso eletrônico] / Mateus Bravo de Aguiar. - 2024.
1 recurso online (67 f. : il., color.) : pdf.

Orientadora: Dayana Cristina Silva Garcia.

Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Minas Gerais, Escola de Engenharia.

Inclui bibliografia.

1. Construção civil - Teses. 2. Materiais de construção - Teses. 3. Cimento - Teses. 4. Compósitos - Teses. 5. Bagaço de cana - Teses. 6. Microestrutura - Teses. I. Garcia, Dayana Cristina Silva. II. Universidade Federal de Minas Gerais. Escola de Engenharia. III. Título.

CDU: 691(043)

Ficha catalográfica elaborada pelo bibliotecário Reginaldo César Vital dos Santos CRB/6 2165
Biblioteca Prof. Mário Werneck, Escola de Engenharia da UFMG

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS**

**ESCOLA DE ENGENHARIA**
**CURSO DE MESTRADO EM CONSTRUCÃO CIVIL**

# FOLHA DE APROVAÇÃO

## INFLUÊNCIA DA CINZA DO BAGAÇO DE CANA-DE-AÇÚCAR NA MICROESTRUTURA DE COMPOSTOS CIMENTÍCIOS COM CURA EM AUTOCLAVE

MATEUS BRAVO DE AGUIAR

Dissertação submetida à Banca Examinadora designada pelo Colegiado do Curso de Mestrado em Construção Civil, como requisito para obtenção do grau de MESTRE EM CONSTRUÇÃO CIVIL, área de concentração Tecnologia na Construção Civil.

Aprovada em 30 de outubro de 2024, pela banca constituída pelos membros:

gov.br Documento assinado digitalmente
DAYANA CRISTINA SILVA GARCIA
Data: 01/11/2024 10:53:04-0300
Verifique em https://validar.iti.gov.br

Profª. Dra. Dayana Cristina Silva Garcia (Orientadora) – DEMC/UFMG

gov.br Documento assinado digitalmente
FERNANDO DO COUTO ROSA ALMEIDA
Data: 31/10/2024 10:17:45-0300
Verifique em https://validar.iti.gov.br

Prof. Dr. Fernando do Couto Rosa Almeida – DEMC/UFMG

gov.br Documento assinado digitalmente
DEBORA RIBEIRO LOPES
Data: 31/10/2024 10:56:53-0300
Verifique em https://validar.iti.gov.br

Dra. Débora Ribeiro Lopes – ICEX/UFMG

gov.br Documento assinado digitalmente
LAISA DO ROSARIO SOUZA CARNEIRO
Data: 01/11/2024 10:18:56-0300
Verifique em https://validar.iti.gov.br

Profª. Dra. Laísa do Rosário Souza Carneiro – CEFET-MG

Belo Horizonte, 30 de outubro de 2024.

Dedico este trabalho a Deus por ter nos dado esse fantástico planeta Terra, com toda essa diversidade, desde as ciências biológicas até a engenharia, e por ter dado ao ser humano a capacidade de explorar, pesquisar e testar as belezas desse universo por Ele criado.

## AGRADECIMENTOS

A Deus primeiramente por ter me dado a oportunidade de estar fazendo um mestrado acadêmico, a Ele seja toda glória e toda honra, e todo mérito por essa vitória alcançada.

Quero agradecer também a minha esposa Vivian Castro dos Santos pelo incentivo dado de nunca parar e sempre me auxiliando para que esse feito fosse concretizado.

Quero agradecer a minha mãe Maria Cristina, pelo apoio, sei que essa vitória era um sonho dela mais do que meu, e agradeço por sonhar de um dia em querer ter um filho mestre, por isso essa conquista é mais sua do que minha.

Ao meu pai Edom Fernandes, que sempre foi o meu parceiro de idas e vindas na UFMG.

A Maria, que desde pequeno caminhou e viu todos os meus passos, essa vitória é sua também.

Aos meus irmãos por sempre demonstrarem alegria para com a minha pessoa, e sempre demonstraram satisfação e contentamento com as minhas vitórias.

Essa pequena homenagem é para vocês também.

Não posso nunca deixar de mencionar os meus avós: Dona Dulce, Dona Odete, Cabo Milton e Paulo Vitorino, que já se foram, mas sempre estarão na memória, sempre nas boas lembranças e das histórias contadas.

Quero agradecer aos meus amigos Alisson de Oliveira e ao Érico Tiago por serem os bons conselheiros e sempre me ajudaram, sejam no trabalho escrito quanto pela ajuda em laboratório, minha eterna gratidão. E por último, a minha orientadora Dayana Cristina, obrigado por você ter me escolhido para ser seu orientando, que Deus abençoe muito a sua vida e sou eternamente grato pela oportunidade me dada. Em especial quero deixar os meus agradecimentos a indústria sucroalcooleira Raízen em Lagoa Santa-MG pela oportunidade e por disponibilizar os resíduos analisados.

“ Quando a ideia foi plantada na minha mente pelo Sr.Carnegie, ela foi treinada, cuidada e atiçada para se manter viva. Gradualmente, a ideia se tornou gigante com o próprio poder, e ela é que me treinou, cuidou de mim e me dirigiu. Ideias são assim mesmo. Primeiro, você dá vida, ação e orientação a elas, então eles ganham um poder autônomo e deixam de lado toda a oposição”.

(Napoleon Hill)

## RESUMO

A cura em autoclave acelera a hidratação do cimento, aumenta a resistência mecânica e permite a desforma rápida. Nesse tipo de cura é comum a utilização de uma fonte externa de silício para melhorar o desenvolvimento da microestrutura e por causa disso, a cinza de bagaço de cana-de-açúcar (CBCA) foi utilizada. Assim, o objetivo desta pesquisa foi avaliar a influência da utilização da cinza do bagaço de cana-de-açúcar (CBCA) na microestrutura de compostos cimentícios submetidos à cura em autoclave. O trabalho foi dividido em duas etapas: análise da heterogeneidade de quatro tipos de CBCA; e avaliar a influência da CBCA na microestrutura e resistência à compressão de compósitos cimentícios. Na primeira etapa, duas cinzas foram obtidas a partir da queima de bagaço e duas a partir da "requeima" de cinzas coletadas nas bacias de decantação para redução da matéria orgânica. As CBCA foram caracterizadas quanto à perda ao fogo, composição química, morfologia, granulometria e reatividade (ensaio de Lúxan). Observou-se comportamento semelhante entre as CBCA dos bagaços e entre as decantadas. As CBCA dos bagaços apresentaram maior reatividade, porém a perda de massa (>90%) inviabilizou sua aplicação. Assim, as CBCA das caldeiras foram usadas para moldar as argamassas com traço 1:3 (aglomerante: areia), na qual o aglomerante foi composto por 0%, 10%, 20% e 30% de CBCA como substituição da massa de cimento. O fator água/aglomerante foi de 0,5 e dois tipos de curas foram realizadas: cura submersa em solução saturada em hidróxido de cálcio e cura em autoclave. As amostras foram analisadas quanto à microestrutura, porosidade, absorção de água e resistência à compressão. A cura submersa resultou em maior resistência mecânica, devido à menor porosidade. As amostras com CBCA apresentaram cerca de 20% de resistência à compressão menor em relação à referência, sem variação significativa entre os diferentes teores de CBCA. Em autoclave, apenas o teor de 30% evitou a formação da fase α-$C_2SH$, permitindo o desenvolvimento de tobermorita e xonotlita. No entanto, a maior porosidade resultou em menor resistência. Conclui-se que a cura submersa proporcionou melhor desempenho que a cura em autoclave.



Palavras-chave: microestrutura; heterogeneidade de resíduos; CBCA; cura autoclave.

## ABSTRACT

Autoclave curing accelerates cement hydration, increases mechanical strength, and enables rapid demolding. In this type of curing, it is common to use an external silicon source to enhance microstructure development; therefore, sugarcane bagasse ash (SCBA) was used. This research aimed to evaluate the influence of SCBA on the microstructure of cementitious composites subjected to autoclave curing. The study was divided into two steps: analysis of the heterogeneity of four types of SCBA, and evaluation of their influence on the microstructure and compressive strength of cementitious composites. In the first stage, two ashes were obtained from bagasse combustion, and two others were re-burned in the laboratory from ashes collected in decantation basins, aiming to reduce organic matter content. SCBA samples were characterized in terms of loss on ignition, chemical composition, morphology, particle size distribution, and reactivity (Lúxan test). Similar behavior was observed between the bagasse-derived ashes and between the decanted ashes. The SCBA from bagasse showed higher reactivity, but the mass loss (>90%) made its use impractical. Thus, the SCBA from the boilers was used to produce mortars with a 1:3 mix ratio (binder:sand), in which the binder consisted of 0%, 10%, 20%, and 30% SCBA as a partial replacement of cement by mass. The water-to-binder ratio was 0.5, and two curing methods were applied: water curing in a saturated calcium hydroxide solution and autoclave curing. Samples were analyzed for microstructure, porosity, water absorption, and compressive strength. Water curing resulted in higher mechanical strength due to lower porosity. SCBA-containing samples showed approximately 20% lower compressive strength compared to the reference, with no significant variation among different SCBA contents. Under autoclave curing, only the 30% replacement level prevented the formation of the α-C2SH phase, enabling the development of tobermorite and xonotlite. However, the increased porosity led to lower strength. It was concluded that water curing provided better performance than autoclave curing.



Keywords: microstructure; waste heterogeneity; SCBA; autoclave curing.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 3.1 – Diagrama esquemático da produção de etanol a partir da geração de caldo de cana e geração de vinhaça ..... 18
Figura 3.2 – Resíduos gerados na extração da cana-de-açúcar ..... 19
Figura 3.3 - Padrão de difração de raios X da CBCA ..... 21
Figura 3.4 - Teste de condutividade elétrica em solução de $Ca(OH)_2$ com quartzo, CBCA, sílica ativa e mistura de quartzo com sílica ativa ..... 22
Figura 3.5 - Relação entre os dados do índice de atividade pozolânica e da variação da condutividade na condutividade elétrica (ΔC) ..... 22
Figura 3.6 – Padrão de Difração de raios-X da CBCA calcinado sob diferentes condições ..... 23
Figura 3.7 – Índice de atividade pozolânica de cinzas de bagaço de cana-de-açúcar queimadas em diferentes temperaturas de calcinação ..... 24
Figura 3.8 – Relação entre o índice de atividade pozolânica com a área superficial específica ..... 25
Figura 3.9 - Teste de condutividade elétrica em solução de $Ca(OH)_2$ ..... 26
Figura 3.10 - Imagens MEV: a) e a') cimento Portland CPV ARI, b) e b') CBCA-CM, c) e c') CBCA-SF. 1- Sílica amorfa fundida esférica; 2 – Sílica cristalina pela combustão incompleta; 3 – Sílica irregular e porosa. ..... 27
Figura 3.11 - Evolução da resistência à compressão das argamassas ..... 28
Figura 3.12 – Resistência à compressão em função do tipo de cura ..... 29
Figura 3.13 – Resistência a compressão de um concreto de ultra-alto-desempenho com diferentes tipos de cura ..... 30
Figura 3.14 - Resistência à compressão das amostras com cura normal e cura a autoclave ..... 31
Figura 4.1 – Fluxograma Metodológico ..... 33
Figura 4.2 – Processo de queima dos bagaços e das cinzas coletadas nas bacias de decantação ..... 36
Figura 4.3 – Moídas em moinhas de bolas (a) Peneiramento após a moagem (b) ..... 37
Figura 4.4 – Ensaio de flow table (a) colocando a amostra no molde e (b) medição após 25 golpes ..... 39
Figura 4.5 – Cura (a) submersa ou (b) em autoclave ..... 39

Figura 4.6 – Pesagem da massa submersa ..... 40
Figura 4.7 - Amostras secas em estufa ..... 40
Figura 4.8 – Máquina Shimadzu para o teste de compressão axial ..... 41
Figura 5.1 – Difratogramas das amostras das CBCA obtidas a partir da queima das cinzas decantadas superior e inferior e dos bagaços claro e escuro ..... 43
Figura 5.2 - Amostras das cinzas inferior e superior *in natura* a após a queima a 600°C ..... 44
Figura 5.3 – Micrografias das cinzas após queima a 600°C: (a) inferior e (b) superior ..... 45
Figura 5.4 – Mapa de composição química da cinza de decantação inferior após queima a 600°C ..... 45
Figura 5.5 - Mapa de composição química da cinza de decantação superior após queima a 600°C ..... 46
Figura 5.6 - Amostras dos bagaços *in natura* e após a queima a 300°C e 600°C ..... 47
Figura 5.7 - Micrografias dos bagaços após queima: (a) claro e (b) escuro ..... 47
Figura 5.8 - Mapa de composição química do bagaço claro após queima a 600°C ..... 48
Figura 5.9 - Mapa de composição química do bagaço escuro após queima a 600°C ..... 48
Figura 5.10 - Análise granulométrica das cinzas e dos bagaços ..... 49
Figura 5.11 - Teste de variação de condutividade elétrica das cinzas de decantação ..... 50
Figura 5.12 – Teste de variação de condutividade elétrica dos bagaços ..... 51
Figura 5.13 – Difratograma da CBCA inferior com cura saturada (a) e cura em autoclave (b) ..... 53
Figura 5.14 – Difratograma da CBCA superior com cura saturada (a) e cura em autoclave (b) ..... 54
Figura 5.15 – Imagens do MEV da Cinza Inferior com cura Saturada (CIS) e cura em Autoclave (CIA) ..... 55
Figura 5.16 – Imagens do MEV da Cinza Superior com cura Saturada (CSS) e cura em Autoclave (CSA) ..... 56
Figura 5.17 – Média das Porosidades dos CP`s (%) ..... 57
Figura 5.18 – Média da Absorção d'água dos CP`s (%) ..... 57
Figura 5.19 – Poros dos CP`s Inferior autoclavados e saturadas ..... 58
Figura 5.20 – Poros dos CP`s Superior autoclavados e normais ..... 58

Figura 5.21 – Média das Resistências à compressão dos corpos-de-prova (MPa)...59

## LISTA DE TABELAS

Tabela 3.1 - Composição química da CBCA de diferentes autores .....20
Tabela 4.1 - Caracterização física do cimento CPV .....34
Tabela 4.2 - Resultados de requisitos físicos e químicos ABNT NBR 7214:2015 da areia normal brasileira .....34
Tabela 4.3 – Granulometria da areia normal brasileira .....34
Tabela 4.4 - Característica técnicas do aditivo MasterGlenium 51 .....35
Tabela 4.5 - Proporções das misturas .....38
Tabela 5.1 - Perda de massa dos resíduos de bagaço de cana-de-açúcar após a queima (%) .....42
Tabela 5.2 - Composição química (%) do cimento Portland, da Sílica ativa e da CBCA .....43

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

CBCA – Cinza do Bagaço de cana de açúcar

EITF – Espectroscopia de infravermelho com transformada de Fourier

FRX – Fluorescência de raio-x

GQS – Areia de quartzo moída

MSC – Materiais cimentícios suplementares

NBR – Norma Brasileira

RPC - (Reactive Powder Concrete)

IPT – Instituto de pesquisas tecnológicas

# SUMÁRIO

**1 INTRODUÇÃO ..... 16**

**2 OBJETIVOS ..... 17**

2.1 Objetivo Geral ..... 17

2.2 Objetivos Específicos ..... 17

**3 REVISÃO DE LITERATURA ..... 18**

3.1 Cinza de bagaço de cana-de-açúcar ..... 18

3.1.1 Reatividade da CBCA ..... 20

3.1.2 Preparo das cinzas de bagaço de cana-de-açúcar ..... 23

3.1.3 Ensaios para avaliar pozolanicade da CBCA ..... 25

3.1.4 Influência da CBCA nas propriedades de compostos cimentícios ..... 27

3.3 Cura de compostos cimentícios ..... 28

3.3.1 Cura Saturada ..... 28

**4 MATERIAIS E MÉTODOS ..... 33**

4.1 Materiais ..... 34

4.1.1 Coleta dos resíduos de cana-de-açúcar ..... 35

4.1.2 Preparo dos resíduos de bagaço de cana-de-açúcar ..... 35

4.2 Métodos ..... 36

4.2.1 Parâmetros de escolha das cinzas ..... 36

4.2.2 Moldagem das amostras ..... 37

4.2.3 Caracterização das amostras ..... 40

**5 RESULTADOS E DISCUSSÕES ..... 42**

5.1 Caracterização dos resíduos queimados ..... 42

5.1.1 Queima e perda de massa dos resíduos de cana-de-açúcar ..... 42

5.1.2 Composição química após a queima de massa ..... 42

5.1.3 Difração de Raios-X ..... 43

5.1.4 Morfologia ..... 44

5.1.5 Análise Granulométrica ..... 49
5.1.6 Ensaio de reatividade por meio de condutividade elétrica ..... 49
5.1.7 Escolha do tipo de resíduo ..... 51
5.2 Caracterização das argamassas ..... 52
5.2.1 Difração de raios-X ..... 52
5.2.2 Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) ..... 54
5.2.3 Porosidade e absorção de água ..... 56
5.2.4 Resistência à Compressão ..... 59
**6 CONCLUSÃO ..... 61**
**7 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS ..... 62**

# 1 INTRODUÇÃO

O uso de materiais cimentícios suplementares (MCS) como substituição ou adição é uma forma de garantir a produção de produtos cimentícios mais sustentáveis, uma vez que a indústria cimentícia consome recursos naturais e emite cerca de 8% de $CO_2$ de toda a atividade antropogênica (ALI, SAIDUR e HOSSAIN, 2011). Nesse contexto, pode-se citar a cinza de bagaço de cana-de-açúcar (CBCA) como um potencial material cimentícios suplementar (FAIRBAIRN, 2010).

O Brasil é o maior produtor de cana-de-açúcar do mundo, produzindo anualmente 814,9 milhões de toneladas (THOMAS, 2021). A maior parte dos resíduos produzidos são descartados em aterros sanitários, sem qualquer possibilidade de reaproveitamento (MONTAKARNTIWONG et.al, 2013). Assim, uma forma de contornar essas questões ambientais é por meio do aproveitamento deste resíduo em materiais de construção.

A CBCA apresenta uma composição química rica em sílica ($SiO_2$), alumina ($Al_2O_3$) e óxido de ferro ($Fe_2O_3$). Quando na forma amorfa, a cinza pode reagir como uma pozolana, consumindo o hidróxido de cálcio proveniente da hidratação do cimento e formando mais silicato de cálcio hidratado (XU et.al, 2018). Consequentemente, as propriedades mecânicas e durabilidade podem ser melhoradas. No entanto, a presença de sílica cristalina pode prejudicar a sua reatividade química e ser considerada como uma impureza indesejável (SOARES et.al, 2016).

Nesse contexto entra a cura em autoclave. Em condições hidrotermais, o quartzo pode reagir e formar mais silicato de cálcio hidratado (GARCIA, WANG, FIGUEIREDO, 2018). Além disso, desde que tomados todos os cuidados necessários, a cura em autoclave pode acelerar as reações de hidratação, melhorar a microestrutura e aumentar o desempenho mecânico (TAM e TAM, 2012). Assim, uma impureza que é considerada indesejável, pode se tornar vantajosa em cura em autoclave. Levando isso em consideração, o objetivo deste trabalho foi avaliar a influência da utilização da cinza do bagaço de cana de açúcar (CBCA) na microestrutura de compostos cimentícios com cura em autoclave. Para isso, o trabalho foi divido em duas partes. Primeiramente foi estudada a heterogeneidade de quatro tipos de CBCA; e posteriormente vai avaliada a influência da CBCA na microestrutura de compósitos cimentícios.

# 2 OBJETIVOS

## 2.1 Objetivo Geral

Avaliar a influência da utilização da cinza do bagaço de cana de açúcar (CBCA) na microestrutura de compostos cimentícios com cura em autoclave.

## 2.2 Objetivos Específicos

- Realizar a coleta e caracterização de diferentes cinzas de bagaço de cana-de-açúcar para avaliar a heterogeneidade destes resíduos;
- Determinar qual o tipo de resíduo mais viável tecnicamente para a confecção das amostras;
- Analisar a formação de fases cristalinas de silicato de cálcio hidratado devido a CBCA e cura em autoclave;
- Analisar as propriedades mecânicas de compósitos cimentícios com CBCA e cura em autoclave.

# 3 REVISÃO DE LITERATURA

Para a argumentação teórica da presente pesquisa foi dado o enfoque nas características físico-químicas da CBCA, demonstrando as semelhanças e diferenças que as CBCA possuem de diferentes autores. Tal revisão bibliográfica serviu como base para as discussões dos resultados após a moldagem das argamassas, demonstrando.

## 3.1 Cinza de bagaço de cana-de-açúcar

Ao discutir resíduos de cana-de-açúcar é crucial mencionar sua origem: a indústria sucroalcooleira. Esse setor da agroindústria é responsável pela produção de açúcar, álcool e outros derivados da cana, além de desempenhar um papel importante na geração de energia no Brasil e em diversos outros países.

O setor sucroalcooleiro desempenha um papel fundamental na economia brasileira. Sabe-se que o Brasil o maior produtor mundial de cana-de-açúcar, com uma produção anual de 814,9 milhões de toneladas (THOMAS, 2021), além de ser responsável por cerca de 60% do etanol consumido globalmente. A Figura 3.1 ilustra o processo de fabricação do etanol a partir do caldo de cana. Nesse processo são gerados vários tipos de resíduos, como a água de lavagem da cana, o bagaço, a torta de filtro e a vinhaça (CÓ JUNIOR *et al*., 2008), conforme demonstrado na Figura 3.2.

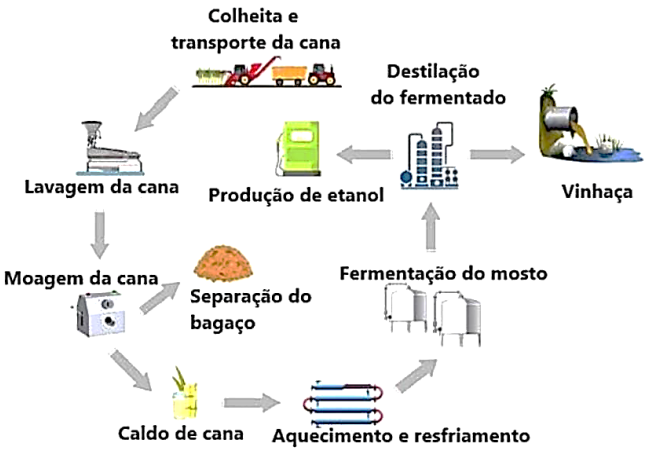



Figura 3.1 – Diagrama esquemático da produção de etanol a partir da geração de caldo de cana e geração de vinhaça

Fonte: Adaptado GBADEYAN *et al.*,2024.

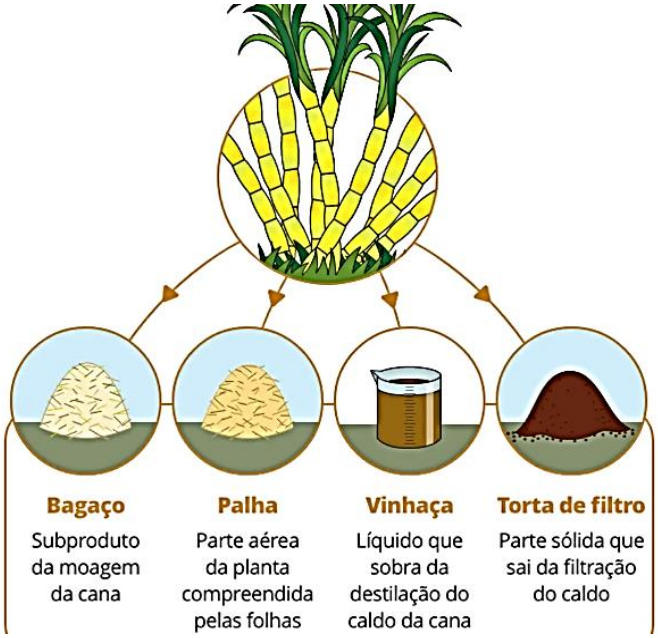



Figura 3.2 – Resíduos gerados na extração da cana-de-açúcar

Fonte: Adaptado Associação Brasileira de Biogás (Abiogás) e Raízen (2021)

O bagaço, que resulta da moagem da cana e da extração do caldo, é o resíduo mais abundante na indústria sucroalcooleira. Com a moagem de 1 tonelada de cana, são produzidos cerca de 250 kg de bagaço, que, quando convertido em energia calórica, equivale a 560.000 kcal (BONASSA *et al.,* 2015). O bagaço pode ser empregado na produção de painéis de fibra para edificações, na produção de celulose e na produção de materiais plásticos. Contudo, a maior parte do bagaço é utilizado para cogeração de energia na própria sucroalcooleira (NOGAROTO, 2023).

No entanto, a queima desse material resulta na formação de outro resíduo: as cinzas. De acordo com Rambabu, Aditya e Ramarao (2015), para cada tonelada de cana-de-açúcar processada, são produzidos aproximadamente 0,62% de cinza bagaço de cana-de-açúcar (CBCA). Além de seu potencial agrícola, a CBCA também apresenta potencial para ser utilizado na indústria da construção civil.

Conforme Tabela 3.1 nota-se que a composição química da CBCA pode variar conforme a localização da colheita e a safra. Contudo, a cinza é predominantemente composta por sílica ($SiO_2$), alumina ($Al_2O_3$) e óxido ferroso ($Fe_2O_3$), o que sugere seu potencial como material cimentício suplementar (MCS) (YADAV *et al.,* 2020). No entanto, a alta perda ao fogo (> 6%) pode limitar sua aplicação, pois reduz a reatividade das cinzas, aumenta a demanda de água e causa problemas de durabilidade em compósitos cimentícios (PONTES *et al.*, 2022). Note que, essa alta

perda ao fogo acontece devido a presença de matéria orgânica no material, resultante da calcinação ineficiente (FREITAS, 2005). Nesses casos, é comum a realização da queima das cinzas para diminuir o teor de matéria orgânica.

Tabela 3.1 - Composição química da CBCA de diferentes autores

| Autores | Composição (%) | | | | | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | $SiO_2$ | $Al_2O_2$ | $Fe_2O_3$ | CaO | $Na_2O$ | $K_2O$ | $SO_3$ | MnO | MgO | $TiO_2$ | $P_2O_5$ | LOI | {P}* |
| [Chusilp *et al.*, 2009] | 54,1 | 5,69 | 3,54 | 15,37 | - | - | 0,03 | - | 1,41 | - | - | 19,36 | 63,33 |
| [Deepika *et al.*, 2017] | 72,95 | 1,68 | 1,89 | 7,77 | 0,002 | 9,28 | - | - | 1,98 | - | - | 21 | 76,52 |
| [Cordeiro *et al.*, 2009] | 78,34 | 8,55 | 3,61 | 2,15 | 0,12 | 3,46 | - | 0,13 | 1,65 | - | 1,07 | 0,42 | 90,5 |
| [Cordeiro *et al.*, 2018] | 53,2 | 13,9 | 4,4 | 2,4 | - | 1,6 | 1,5 | 0,1 | - | 0,8 | 1,3 | 20,9 | 71,5 |
| [Clark *et al.*, 2017] | 70,37 | 13,01 | 3,16 | 1,07 | 1,13 | 2,28 | - | 0,12 | 1,07 | 0,97 | 0,3 | 6,51 | 86,54 |
| [Arif *et al.*, 2016] | 78,49 | 7,27 | 3,85 | 1,28 | 0,69 | 1,41 | 1,55 | - | 1,28 | - | - | - | 89,61 |
| [De Soares *et al.*, 2016] | 72,3 | 5,52 | 10,8 | 1,57 | - | - | - | - | 1,13 | 3,68 | 1,11 | 1,52 | 88,62 |
| [Pereira *et al.*, 2015] | 78,59 | 4,47 | 4,88 | 1,34 | 0,22 | 2,37 | 0,66 | - | 1,03 | 1,16 | - | 4,4 | 87,94 |
| [Guglielmeth *et al.*, 2018] | 80,4 | 7,84 | 3,58 | 0,51 | 0,37 | 1,5 | 0,09 | 0,08 | 0,37 | 0,93 | 0,19 | 3,03 | 91,92 |
| [Minhaj *et al.*, 2017] | 85,17 | 1,69 | 2,73 | 2,59 | 0,29 | 0,36 | 0,17 | - | 0,69 | - | - | 3,55 | 89,59 |
| [Setayesh *et al.*, 2017] | 69,94 | 3,34 | 1,25 | 2,27 | 1,49 | 5,83 | 0,42 | 0,059 | 6,68 | 0,08 | 6,12 | 2,35 | 74,53 |
| [Cordeiro *et al.*, 2015] | 80,8 | 5,1 | 1,6 | 3,1 | - | 6,3 | 1,5 | 0,1 | - | 0,3 | 0,8 | 0,4 | 87,5 |
| [Cordeiro *et al.*, 2016] | 74,1 | 8,5 | 6,4 | 4,4 | - | 1,9 | 2,1 | 0,1 | - | 0,2 | 0,9 | 1,3 | 89 |
| [Alavéz Ramirez *et al.*, 2012] | 51,66 | 9,92 | 2,32 | 2,59 | 1,23 | 2,1 | - | 1,23 | 1,44 | 0,74 | 0,9 | 24,15 | 63,9 |
| [Bayuaji *et al.*, 2018] | 72,14 | 4,86 | 7,75 | 7,13 | 0,46 | 3,6 | - | 0,32 | 1,63 | 0,31 | 1,27 | - | 84,75 |
| * Soma dos teores de $SiO_2$, $Al_2O_3$ e $Fe_2O_3$ | | | | | | | | | | | | | |

Fonte: Adaptado YADAV *et al.*, (2020).

### *3.1.1 Reatividade da CBCA*

Conforme descrito anteriormente, a CBCA apresenta potencial para ser utilizada como uma adição em materiais cimentícios, uma vez que é rica em sílica e alumia (CORDEIRO *et al.,* 2008). Além disso, desde que ela apresente granulometria adequada e sílica amorfa, também pode agir como um material reativo, ou seja uma pozolana (Yadav *et al.*, 2020). Segundo a Associação Brasileira de Normas Técnicas ABNT NBR 12653:2015, materiais pozolânicos são silicosos ou sílico-aluminosos com pouca propriedade cimentícia, mas com partículas finas e na presença de umidade, reage com o hidróxido de cálcio e forma silicato de cálcio hidratado (C-S-H). Segundo Isaia (2011), as pozolânas promovem primeiramente o efeito microfiler, refinamento da estrutura dos poros e servido como pontos de nucleação. Após a hidratação do cimento e em pH alcalino, eles promovem a densificação da microestrutura da matriz

cimentícia e da zona de transição em concretos. Todos estes efeitos ao longo prazo melhoram a durabilidade e a resistência mecânica.

No entanto, a presença de altos teores de sílica cristalina, ao invés de sílica amorfa, também foi reportada na literatura. No trabalho de Torres *et al.* (2024) pode-se observar alto índice de cristalinidade de CBCA (Figura 3.3). Isso explica a reduzida reatividade da cinza obtido no trabalho, devido à presença de sílica na forma de quartzo. No entanto, quando comparada a reatividade química da CBCA com amostras de sílica cristalina, a CBCA é um pouco reativa, devido à parcela amorfa.

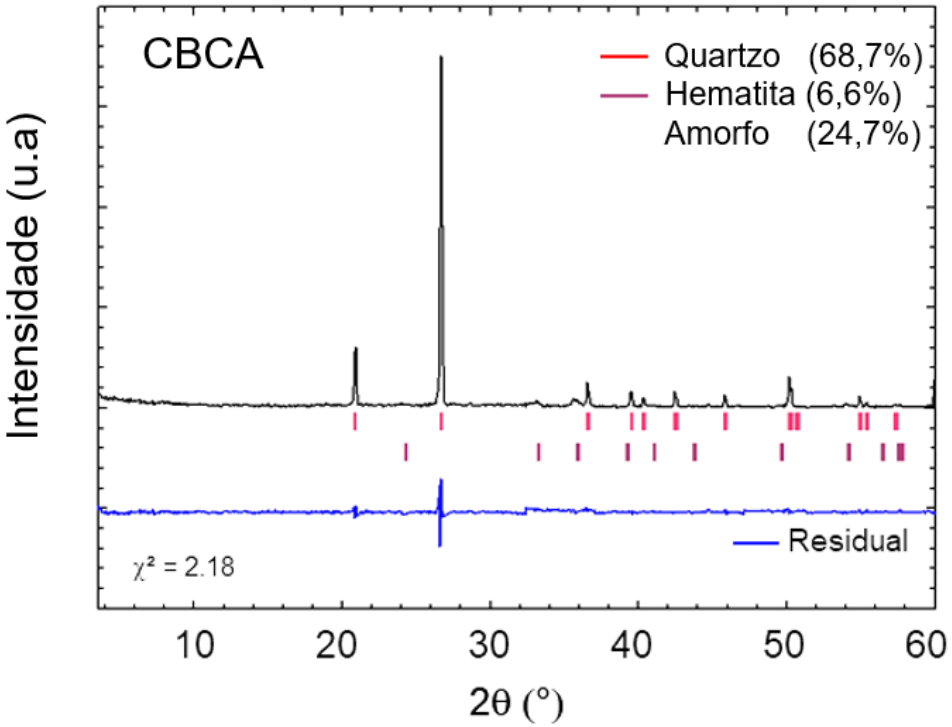



Figura 3.3 - Padrão de difração de raios X da CBCA

Fonte: Adaptado JESUS *et al.*, 2024.

Soares *et al.* (2016) compararam a reatividade química da CBCA com a sílica ativa (amorfa) e quartzo moído (cristalino) através do experimento de variação de condutividade elétrica em solução saturada de hidróxido de cálcio (Figura 3.4). Os resultados mostraram que a sílica ativa é uma pozolana, uma vez que reage facilmente com o hidróxido de cálcio e reduz a condutividade elétrica da solução. Em contrapartida, o quartzo praticamente não reage e a CBCA avaliada apresentou alto teor de quartzo em sua composição, explicando a sua baixa reatividade química.

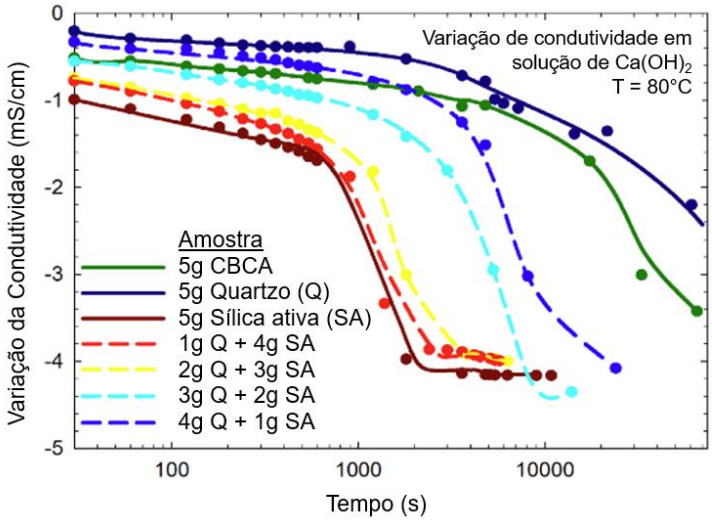



Figura 3.4 - Teste de condutividade elétrica em solução de $Ca(OH)_2$ com quartzo, CBCA, sílica ativa e mistura de quartzo com sílica ativa

Fonte: Adaptado SOARES *et al.*,2016.

No trabalho de Cordeiro, Tavares e Toledo Filho (2016) é possível observar uma correlação linear entre o teor da parcela amorfa com o índice de atividade pozolânica (Figura 3.5). Assim, quanto maior a presença de sílica cristalina, menos pozolana a CBCA será. Outros trabalhos na literatura também chegaram a mesma conclusão (SOARES *et al.* 2016; JESUS *et al.* 2024). Quando isso acontece, aconselha-se que a CBCA seja utilizada como agregado miúdo ou como um fíler, uma vez que apresentarem propriedades pozolânicas insignificantes (MARTINS e ZANELLA, 2009).

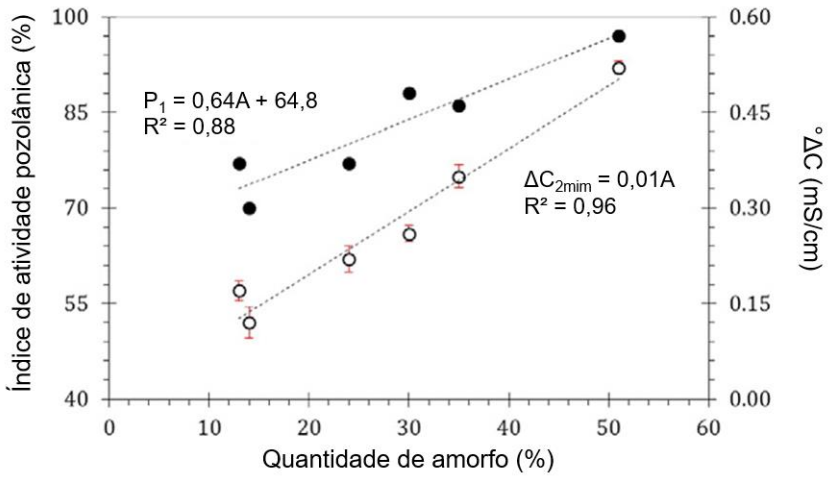



Figura 3.5 - Relação entre os dados do índice de atividade pozolânica e da variação da condutividade na condutividade elétrica (ΔC)

Fonte: Adaptado CORDEIRO, TAVARES E TOLEDO FILHO (2016).

### *3.1.2 Preparo das cinzas de bagaço de cana-de-açúcar*

#### 3.1.2.1 Calcinação

Soares *et al.* (2014) estudaram a influência das condições de queima da CBCA nas características físico-químicas das cinzas geradas. A queima ocorreu com e sem circulação de ar no forno e nas temperaturas de 400, 600 e 800 °C (Figura 3.6). Os resultados demonstraram que com circulação de ar houve decomposição do material orgânico na temperatura de 600°C e a formação de cristobalita na temperatura de 800°C. Com relação ao material queimado sem o fluxo de ar, observa-se picos de quartzo na temperatura de 600°C, e quase nenhum pico de difração nas temperaturas de 400ºC, o que segundo os autores indica a presença de grande volume de matéria orgânica e impurezas.

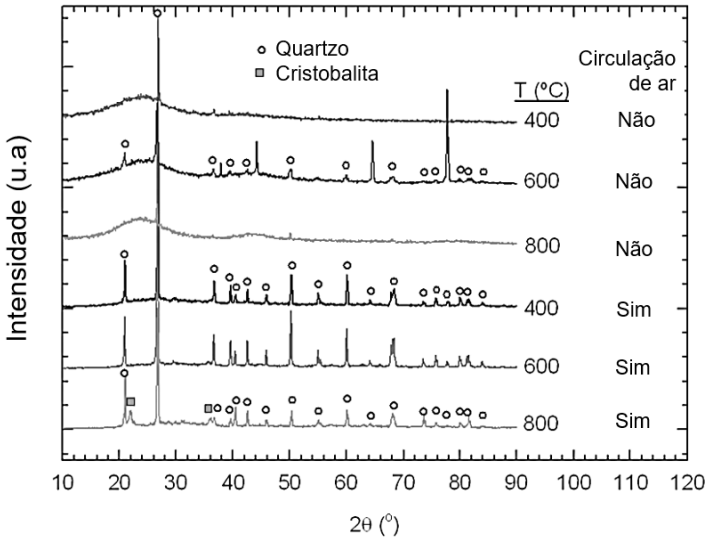



Figura 3.6 – Padrão de Difração de raios-X da CBCA calcinado sob diferentes condições

Fonte: Adaptado SOARES *et al.* (2014).

Segundo Yadav *et al.* (2020), quanto maior a quantidade de sílica amorfa presente na CBCA, maior será a sua atividade pozolânica. Esse teor pode ser aumentando com incremento da temperatura de queima, observando-se um aumento significativo até cerca de 800°C. Acima dessa temperatura ocorre a formação de cristobalita, resultante da cristalização de sílica amorfa em altas temperaturas.

No trabalho de Cordeiro, Toledo Filho e Farbian (2010), foi avaliado o índice de atividade pozolânica (IAP) para cinzas de bagaço de cana-de-açúcar obtidas em

diferentes temperaturas. Os resultados mostraram que temperatura de 600°C é a mais indicada, obtendo melhores valores de resistência à compressão (Figura 3.7).

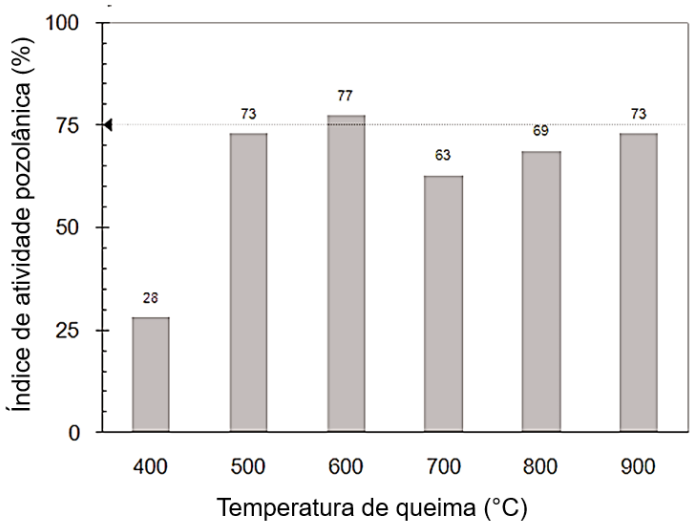



Figura 3.7 – Índice de atividade pozolânica de cinzas de bagaço de cana-de-açúcar queimadas em diferentes temperaturas de calcinação

Fonte: Adaptado CORDEIRO, TOLEDO FILHO E FAIRBAIRN (2010)

Altoé *et al.* (2015) avaliaram a influência da temperatura nas propriedades de CBCA coletadas no fundo da caldeira e nas piscinas de decantação. A temperatura de queima variou de 650°C a 850°C. Para avaliar a reatividade delas, foram utilizados o método de Chapelle Modificado e análises de difração de raios-X. As cinzas com temperatura de queima de 600°C e 650°C e coletadas nas piscinas de decantação apresentaram maior atividade pozolânica, sendo deduzido pelo autor que além da temperatura de queima a granulometria também influencia na pozolanicidade.

### 3.1.2.2 Moagem

Um outro fator que interfere na atividade pozolânica da CBCA é a sua área superficial. Isso, pois, quanto maior a área superficial maior a reatividade química. A partir disso, a moagem dos componentes torna-se uma prática fundamental, uma vez que a moagem aumenta a área superficial da cinza (CORDEIRO *et al*., 2009). De acordo com Thomas *et al.* (2021) a redução do tamanho das partículas aumenta a área superficial específica da CBCA. Assim, é comum a realização de moagem mecânica para deixar as partículas da CBCA mais finas.

No trabalho de Cordeiro e Kurtis (2017) observa-se uma relação diretamente proporcional do aumento da área superficial específica com o índice de atividade pozolânica (Figura 3.8). Note que, tanto aos 7 dias como aos 28 dias de cura, o índice de atividade pozolânica aumentou com o aumento da área superfiical. De acordo com os autores, parece haver um valor ótimo de área superficial específica acima do qual os efeitos físicos e químicos são eficazes e aumenta a resistência mecânica.

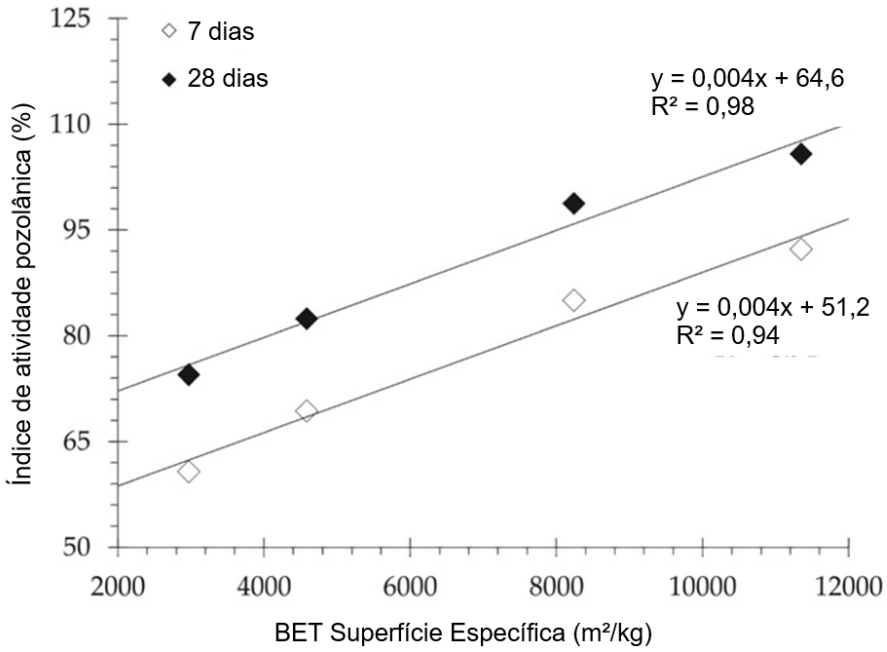



Figura 3.8 – Relação entre o índice de atividade pozolânica com a área superficial específica

Fonte: Adaptado CORDEIRO e KURTIS (2017)

### *3.1.3 Ensaios para avaliar pozolanicade da CBCA*

A atividade pozolânica é influenciada por inúmeros fatores, dentre os quais podem ser citados os teores de portlandita e da pozolana, pH do meio, teor de fase amorfa na adição mineral e composição da matriz cimentícia (LOTHENBACH *et al.*, 2011). A avaliação da pozolanicidade de um material pode ser realizada de várias maneiras, utilizando métodos para isso (HOPPE *et al.*, 2017). Alguns testes podem ser feitos para determinar o grau de pozolanicidade, como por exemplo: Chapelle modificado, condutividade elétrica e índice IAP.

O ensaio de Chapelle modificado é utilizado para avaliar a atividade pozolânica de materiais. Para isso, a quantidade de hidróxido de cálcio fixada é determinada por meio de titulação química ABNT NBR 15895 (2010). Costa (2017) realizou o teste de

Chapelle modificado CBCA calcinada a 650°C. Como resultado, a CBCA foi classificada como um material pozolânico, uma vez que fixou 455 mg de $Ca(OH)_2$. Com relação a resistência à compressão, as amostras moldadas com esse material apresentaram 29,10 MPa.

O ensaio Lúxan avalia a reatividade pozolâninca por meio da variação de condutividade elétrica. Para isso, uma solução saturada de hidróxido de cálcio é preparada e o material a ser testado é adicionado. Se houver reatividade, a condutividade elétrica irá cair. A Figura 3.9 apresenta a reatividade da sílica ativa, CBCA e do quartzo triturado. Conforme demonstrado no estudo de Torres *et al.* (2024) a sílica ativa exibiu maior atividade pozolânica. Embora a CBCA apresentou uma variação da condutividade elétrica maior nos tempos iniciais, no final do experimento o seu comportamento está similar ao do quartzo moído. Isso pode ser explicado, pois, a CBCA utilizada apresentou alto grau de cristalinidade, mas, ainda assim tem uma parcela amorfa, diferentemente do quartzo, que é todo cristalino.

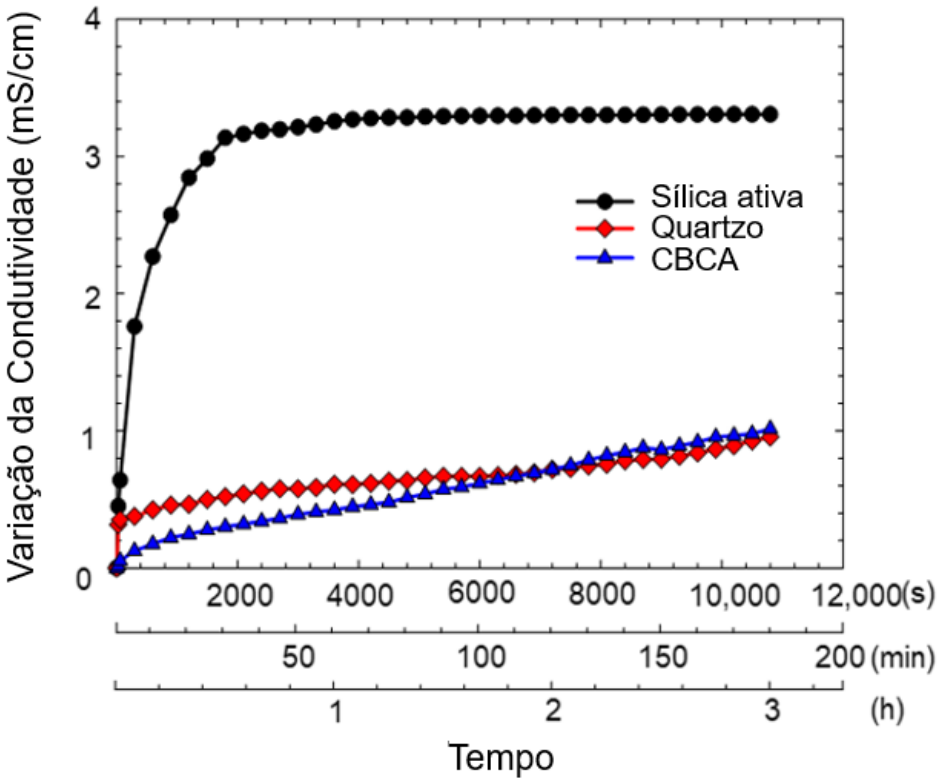



Figura 3.9 - Teste de condutividade elétrica em solução de $Ca(OH)_2$

Fonte: Adaptado TORRES *et al.* (2024).

### *3.1.4 Influência da CBCA nas propriedades de compostos cimentícios*

No trabalho de Sampaio *et al.* (2014), houve alteração da trabalhabilidade e das propriedades mecânicas devido a utilização da CBCA. No estado fresco, observou-se redução na trabalhabilidade. Isso se deve ao fato das partículas pequenas da CBCA utilizada, aumentando a demanda de água para manter a consistência das amostras. Como resultado, para uma mesma relação água/cimento, obteve-se um concreto mais seco e menos trabalhável devido a CBCA.

De acordo com Thomas et al. (2021), a incorporação de CBCA em materiais cimentícios exige a utilização de aditivos plastificantes para manter a trabalhabilidade. Isso, devido a forma irregular, angular e porosa das partículas de CBCA. A Figura 3.10 apresenta imagens de MEV que mostram que as partículas do cimento (a) são menores e mais regulares em comparação com as CBCA apresentadas. As CBCAs (Figura 3.7 b e c) possuem partículas porosas e de vários tamanhos, e com formatos diferentes. No trabalho de Chusilp, Jaturapitakkul e Kiattikomol (2009), concretos com 10, 20 e 30% de CBCA precisaram de 3,15; 5,25 e 7,35 kg/m³ de superplastificante para manter o abatimento de 150 – 200 mm alcançando na amostra referência e sem aditivo.

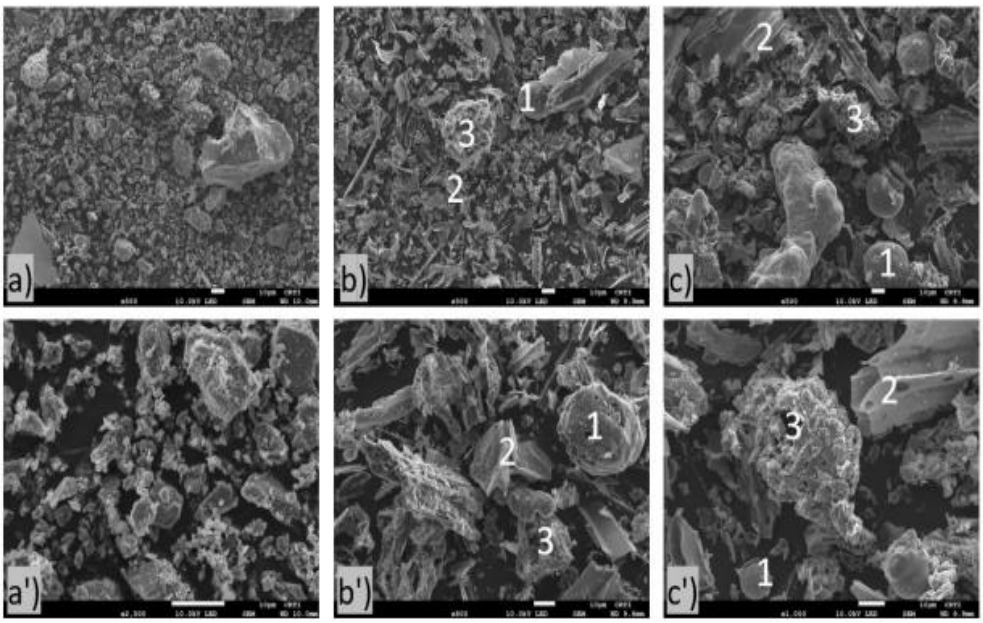



Figura 3.10 - Imagens MEV: a) e a') cimento Portland CPV ARI, b) e b') CBCA-CM, c) e c') CBCA-SF. 1- Sílica amorfa fundida esférica; 2 – Sílica cristalina pela combustão incompleta; 3 – Sílica irregular e porosa.

Fonte: FERREIRA,2023.

O trabalho de Freitas (2005) mostrou que a substituição de parte da massa do cimento por CBCA reduziu a resistência à compressão de argamassas (Figura 3.11). Essa redução foi maior à medida que o teor de CBCA aumentou. Outros estudos como o de Moretti *et al.* (2016) também mostraram uma queda na resistência à medida que o teor de CBCA aumentava, o mesmo obtido por Khawaja *et al.* (2021) no qual ao aumentar a substituição para mais de 10%, houve uma queda na resistência.

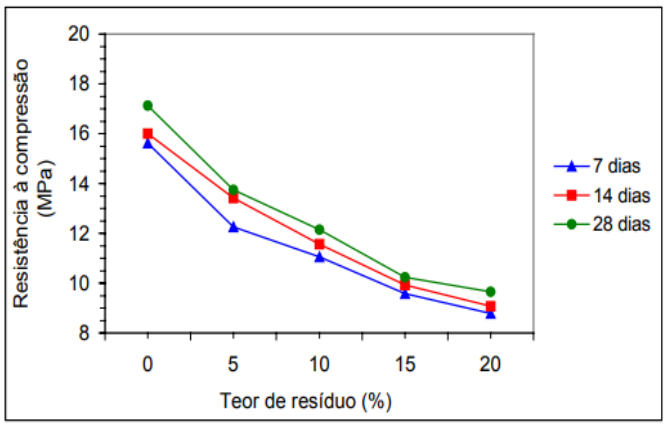



Figura 3.11 - Evolução da resistência à compressão das argamassas

Fonte: FREITAS,2005.

Uma possível explicação para isso é que, mesmo que a CBCA seja reativa, as reações pozolânicas são mais lentas, exercendo mais influência em maiores idades de hidratação (SAMPAIO *et al.*, 2014). No trabalho de Modani e Vyawahare (2013) houve o aumento da resistência em idades mais avançadas, o que foi atribuído pelos autores às propriedades pozolânicas do CBCA e à formação de gel de silicato de cálcio hidratado (C-S-H).

## 3.3 Cura de compostos cimentícios

### *3.3.1 Cura Saturada*

A cura é um processo realizado em materiais cimentícios para impedir ou minimizar a saída da água. Essa perda de água prematura provoca retração e microfissuração no concreto, comprometendo a resistência mecânica e durabilidade (METHA e MONTEIRO, 2014). A Norma Brasileira NBR 5738/2015 define como

padrão, além da cura úmida, a cura submersa em solução saturada de hidróxido de cálcio.

Figueiredo *et al.* (2019) estudaram a resistência à compressão e retração plástica de um concreto com três condições de cura diferentes: cura submersa, sem cura e cura em obra (molhados por três dias, uma vez ao dia). Nota-se que a cura submersa foi a que apresentou valores mais altos de resistência mecânica aos 28 dias, seguida pela cura em obra (Figura 3.12). As amostras que não foram curadas, apresentaram os menores valores. No entanto, com 3 dias de cura, o concreto com cura submersa apresentou o menor valor de resistência à compressão. Isso provavelmente se deve às altas temperaturas registradas durante o período, que aceleraram o processo de hidratação do cimento nos outros tipos de cura.

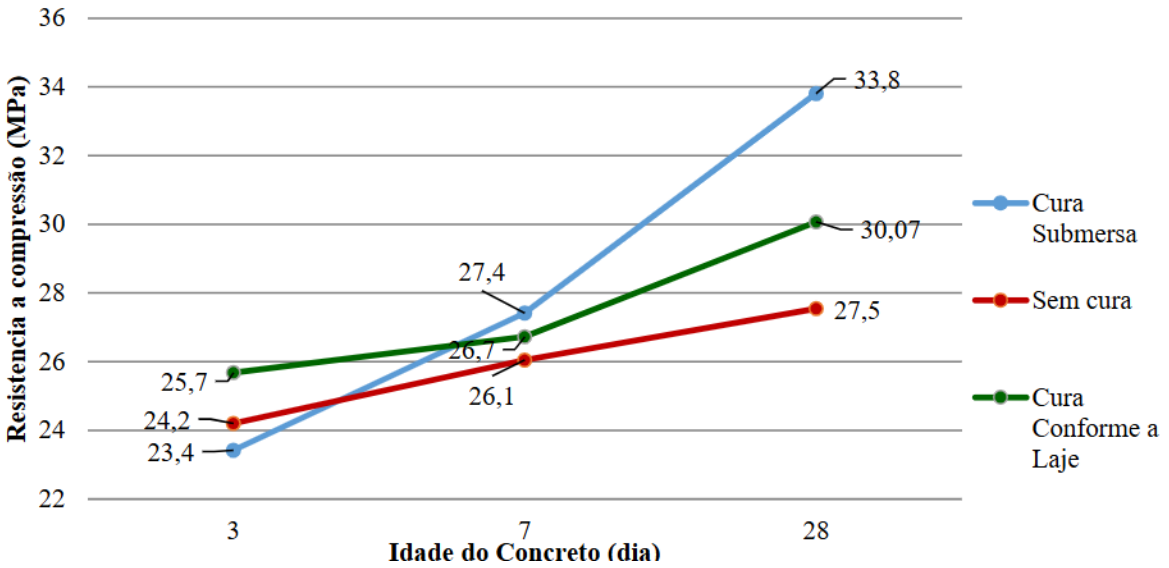



Figura 3.12 – Resistência à compressão em função do tipo de cura

Fonte: Adaptado FIGUEIREDO et al. (2019)

No trabalho de Tian, Liu e Wang (2021) foi avaliada a influência de diferentes tipos de curas nas propriedades de um concreto de ultra-alto-desempenho reforçado com fibras de carbono. Foi observado que o tipo de cura influência diretamente nas propriedades mecânicas do concreto (Figura 3.13). Os maiores valores foram obtidos com cura em autoclave, seguido pela cura Ohmica e cura a vapor. O aumento da resistência à compressão para os três tipos de curas especiais foi maior do que 40% em relação a cura na temperatura ambiente.

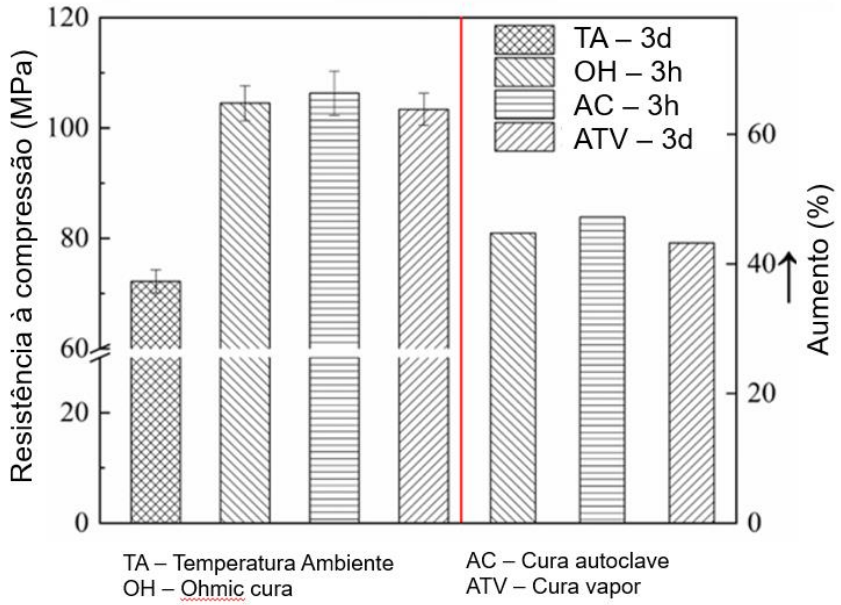



Figura 3.13 – Resistência a compressão de um concreto de ultra-alto-desempenho com diferentes tipos de cura

Fonte: Adaptado TIAN, LIU e WANG, 2021.

### *3.3.2 Cura em Autoclave*

A indústria de pré-moldados geralmente utiliza tratamento térmico em materiais cimentícios. Isso é feito com o objetivo de acelerar as reações de hidratação do cimento, as reações pozolânicas e consequentemente aumentar a resistência mecânica nas idades iniciais (FAMY *et al.,* 2002).

Contudo, esse processo deve ser realizado de maneira controlada, para evitar a desidratação da matriz cimentícia. Isso, pois, as fases do concreto são instáveis quando submetidas a altas temperaturas, trazendo prejuízos para a hidratação, desidratando compostos hidratados e modificando a natureza química de alguns compostos. Em temperaturas mais altas, ocorre a perda de água, podendo desidratar o C-S-H, hidróxido de cálcio e etringita (ALONSO e FERNANDES, 2004).

A autoclave é uma máquina de pressão que permite a imposição simultânea de pressão (a vácuo ou positiva) e calor (PLÁCIDO, 2014), podendo ser usada no período de cura em materiais cimentícios. Nos materiais cimentícios, a cura em autoclave pode acelerar a hidratação do cimento e as reações pozolânicas (em temperaturas em torno de 90°C), além de modificar a microestrutura, podendo haver a formação de C-S-H cristalino (em temperaturas acima de 150°C) com baixa relação Ca/Si (GARCIA,

2019), e a formação de tobermorita e xonotlita, que estão relacionadas com a maior resistência mecânica (TAM e TAM, 2012). Isso foi demonstrado na Figura 3.14, onde a cura em autoclave teve um ganho de resistência à compressão em comparação com a cura normal (saturada), quando a relação água/aglomerante foi inferior a 0,3.

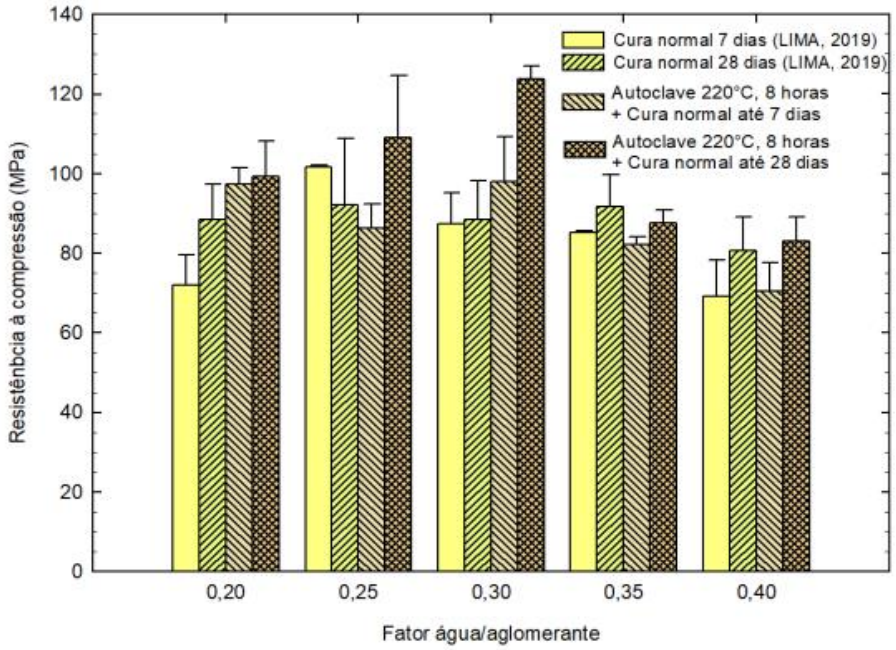



Figura 3.14 - Resistência à compressão das amostras com cura normal e cura a autoclave

Fonte: GARCIA et al., 2023.

Como foi observado no trabalho de Andrade (2015), no qual o autor submeteu amostras de concretos de pós-reativos a cura em autoclave sob temperatura de 150 °C e pressão de 150 kPa, os resultados relataram que a cura em autoclave não demonstrou ganhos significativos de resistência. De acordo com os autores isso pode ter acontecido devido a limitações do próprio equipamento e do processo utilizado, no qual, as amostras foram colocadas no equipamento ainda no estado fresco.

Com cura em autoclave, é necessário evitar a formação de α-C2SH [Ca2SiO3(OH)2], que está relacionado a menor resistência, causando a redução do volume de sólidos, aumento da permeabilidade e consequentemente a redução da resistência à compressão (MELLER *et al.,* 2007). Para isso, o tratamento em autoclave deve ser feito com a adição de silício entre os compostos cimentícios, como o utilizado por YAZICI (2007), onde os espécimes autoclavados que continham apenas cimento Portland Tipo I apresentaram resistência à compressão muito baixa.

Essa adição de silício pode ser feita até mesmo com quartzo moído. No trabalho realizado por Garcia, Wang e Figueiredo (2018), a substituição de quartzo entre 0% a 10%, não foi suficiente para evitar a formação de α-C2SH em pastas de cimento submetidos a cura em autoclave. Porém, teores maiores do que 20% de quartzo impediram a formação dessa fase e promoveu a formação de tobermorita e xonotlita, associados a maior dureza.

No trabalho de Anjos *et al.* (2013) foi utilizada a CBCA, rica em sílica cristalina. Nesse caso, os pesquisadores adicionaram 40% de CBCA curados a 22°C por 28 dias e 280°C/17,2 MPa de pressão por 3 dias, rendeu a transformação de C-S-H comum em C-S-H de sílica rica, resultando em uma melhor resistência à compressão e permeabilidade das pastas de cimento. No trabalho em questão, a CBCA foi utilizada para avaliar o comportamento de cimentos para poços de petróleo.

# 4 MATERIAIS E MÉTODOS

A presente pesquisa foi realizada nos laboratórios da Universidade Federal de Minas Gerais (UFMG). Conforme objetivo geral, este trabalho analisou a influência da utilização da cinza do bagaço de cana-de-açúcar (CBCA) na microestrutura de compósitos cimentícios com cura em autoclave. A primeira etapa do trabalho foi realizar a coleta e preparo dos resíduos de uma sucroalcooleira, e posteriormente determinar a perda de massa, caracterização química, mineralógica, morfológica, granulometria, e reatividade química das CBCAs obtidas. O próximo passo foi moldar os corpos de provas e realizar os seguintes testes e caracterizações: difração de raios-X, microscopia eletrônica de varredura (MEV) resistência à compressão e porosidade. A fluxograma da pesquisa está apresentado na Figura 4.1.

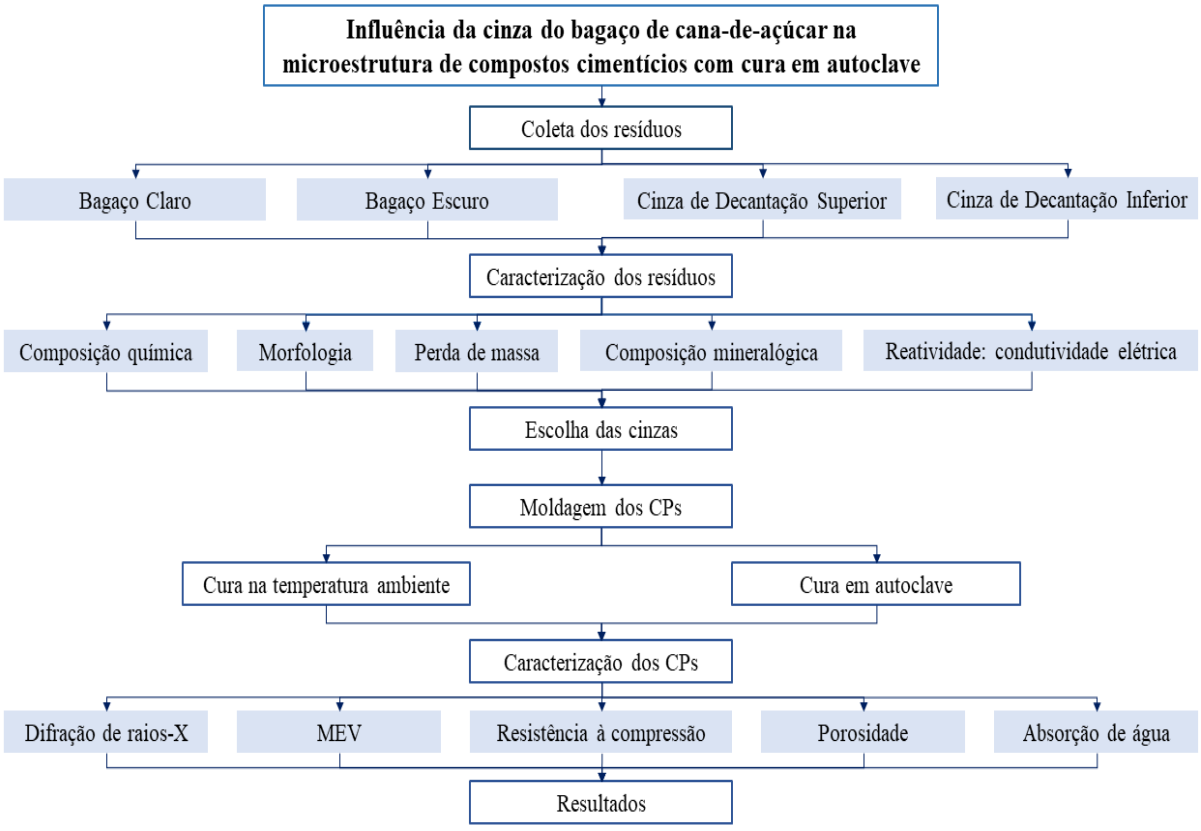



Figura 4.1 – Fluxograma Metodológico

## 4.1 Materiais

Os materiais utilizados foram: Cimento Portland tipo CP-V, cinza de bagaço de cana-de-açúcar, areia normatizada do IPT e aditivo superplastificante à base de policarboxilatos. Os resíduos de cana-de-açúcar foram obtidos na indústria sucroalcooleira, na Cidade de Lagoa da Prata-MG.

O cimento CP-V foi escolhido por ser um tipo de cimento com menos adições e mais fácil de encontrar no mercado. Na Tabela 4.1 estão apresentadas as características físicas do CPV, obtidas pelo fabricante.

Tabela 4.1 - Caracterização física do cimento CPV

| **Propriedade** | | **Norma** | **Valor Obtido** |
|---|---|---|---|
| Massa específica | | ABNT NBR 16605 (ABNT, 2017) | 2,8 à 3,2 g/cm³, a 20ºC |
| Finura | 325 | ABNT NBR 16372 (ABNT, 2015b) | 1,3% |
| | Blaine | | 507 m2²/kg |
| Tempo de pega | Início | ABNT NBR 16607 (ABNT, 2018b) | 113 min |
| | Fim | | 148 min |
| Resistência à compressão | 1 dia | ABNT NBR 16697 (ABNT, 2018a) | 26,1 MPa |
| | 3 dias | | 41,4 MPa |
| | 7 dias | | 47,9 MPa |
| | 28 dias | | 53,7 MPa |

Fonte: Fabricante (2022).

Na Tabela 4.2 estão apresentados os requisitos físicos e químicos para a areia normatizada, de acordo com a NBR 7214 (ABNT, 2015). Na Tabela 4.3 estão apresentada a granulometria das areias.

Tabela 4.2 - Resultados de requisitos físicos e químicos ABNT NBR 7214:2015 da areia normal brasileira

| **Determinação** | **Resultados** | **Requisito** |
|---|---|---|
| Teor de sílica – ABNT NBR 14656:2001 | 97,4 | ≥ 95%, em massa |
| Umidade – ABNT NBR 7214:2015 | 0,0 | ≤ 0,2%, em massa. |
| Matéria orgânica ABNT NBR NM 49: 2001 | < 100 ppm | ≤ 100 ppm |

Fonte: IPT (2023).

Tabela 4.3 – Granulometria da areia normal brasileira

| **Fração** | **Material entre as peneiras de abertura nominal** | **Porcentagem em massa %** | |
|---|---|---|---|
| | | **Resultados** | **Requisito** |
| 16 | 2,4 mm e 2,0 mm | 1 | ≤ 10 |
| | 2,0 mm e 1,2 mm | 97 | ≥ 90 |
| 30 | 1,2 mm e 0,6 mm | 99 | ≥ 95 |
| 50 | 0,6 mm e 0,3 mm | 99 | ≥ 95 |
| 100 | 0,3 mm e 0,15 mm | 96 | ≥ 95 |

Fonte: IPT (2023).

O MasterGlenium 51 é um aditivo superplastificante à base de policarboxilato. Ele é um redutor de água (cerca de 40%), e que pode melhora à coesão, sem modificar o tempo de pega do cimento. Os dados técnicos referentes ao aditivo são descritos na Tabela 4.4.

Tabela 4.4 - Característica técnicas do aditivo MasterGlenium 51

| | |
|---|---|
| **Base química** | Éter Policarboxilico |
| **Aspecto TM761B** | Líquido Branco turvo |
| **Densidade (g/cm³) TM 103B** | 1,080 a 1,120 |
| **pH TM112B*** | 7 – 9 |
| **Sólidos TM 613 B** | 45 – 49 |

Fonte: (BASF, 2014).

### *4.1.1 Coleta dos resíduos de cana-de-açúcar*

Para avaliar a heterogeneidade e realizar a escolha o tipo de CBCA mais viável para confeccionar os corpos de provas, quatro tipos de resíduos foram analisados: dois tipos de resíduos coletadas nos tanques de decantação e dois tipos de bagaços de cana-de-açúcar. As cinzas de decantação receberam o nome de cinza de decantação inferior quando foram coletadas no fundo do tanque e cinza de decantação inferior quando foram coletadas na superfície. Nota-se que, essas cinzas são provenientes da queima do bagaço em caldeiras para a cogeração de energia.

Os bagaços que não são utilizados para a cogeração de energia são armazenados no pátio da indústria, sendo utilizado no período de entressafra. Dois tipos de bagaços foram obtidos para a queima controlada em laboratório. O bagaço claro (obtido logo após a extração do caldo) e o bagaço escuro (armazenado há mais tempo na indústria).

### *4.1.2 Preparo dos resíduos de bagaço de cana-de-açúcar*

Para reduzir a quantidade de matéria orgânica e determinar a perda de massa, foi realizada a queima dos resíduos coletados. Os bagaços foram submetidos a um processo de queima em duas etapas: a primeira a 300°C durante 3 horas, e a segunda a 600°C também durante 3 horas. Durante o aquecimento, a taxa empregada foi de 10 ºC/s. Após a queima, as amostras foram retiradas do forno para um resfriamento rápido ao ar.

É importante ressaltar que, dado que os resíduos coletados nas bacias de decantação já passaram pelo processo de queima na indústria para a cogeração de energia, a etapa de preparo realizada focou exclusivamente na segunda parte do processo. Isso significa que o procedimento ocorreu em um forno a 600°C, durante um período de 3 horas, com aquecimento a uma taxa de 10ºC por segundo e subsequente resfriamento rápido. Esta abordagem metodológica segue os parâmetros adotados por Soares (2013). As condições referentes às queimas, tanto dos bagaços como das cinzas coletadas na bacia de decantação, estão apresentadas na Figura 4.2.

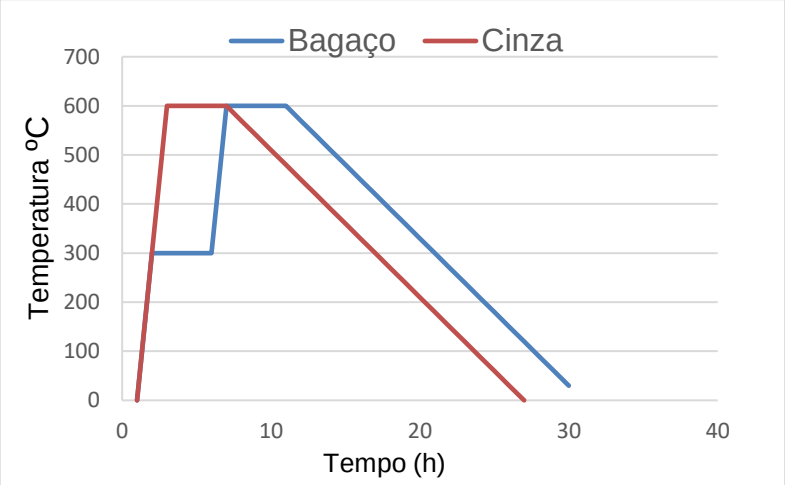



Figura 4.2 – Processo de queima dos bagaços e das cinzas coletadas nas bacias de decantação

## 4.2 Métodos

### *4.2.1 Parâmetros de escolha das cinzas*

Para a escolha dos resíduos de cana-de-açúcar mais adequados para a moldagem das amostras, foram realizadas as seguintes caracterizações: perda de massa após a queima, granulometria, composição química, difração de raios-X, morfologia e reatividade química.

Para isso, primeiramente foram analisadas a perda de massa das cinzas, que corresponde à diferença da massa inicial das amostras *in natura* pela massa após a queima. Para a análise granulométrica foram utilizadas as peneiras da série normal.

A difração de raios-X foi realizada nas amostras em pó no equipamento Difratômetro Philips, modelo PW1710, utilizando radiação CuKα (1,5468 Å), variação angular de 0,06°, tempo de contagem de 3s, intervalo de varredura de 3° até 60°. A morfologia do material foi estabelecida pela microscopia eletrônica de varredura (MEV).

No caso do experimento da condutividade elétrica, o processo foi feito por meio de um condutivímetro calibrado, o qual o experimento teve os seguintes procedimentos: aquecer 200 ml de água destilada até 40°C, acrescentar 2 g de hidróxido de cálcio e acrescentar mais água destilada até completar 1 L de solução. Após, filtrar 200 ml da solução e colocar a solução para aquecer até 40°C. Quando a temperatura estabilizar, medir o primeiro valor de condutividade. Posteriormente, acrescentar 5g do material que será testado, e anotar os dados de condutividade em: 30 segundos, 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9 e 10 minutos, e depois a cada 5 min, finalizando em um tempo total de 3 horas.

Depois de examinar os resultados dos quatro tipos de resíduos, optou-se por fazer as moldagens com os resíduos que foram coletados nas bacias de decantação e que foram requeimadas. Esta conclusão é justificada pela considerável perda de massa dos bagaços o que tornaria inviável a obtenção do material necessário para a confecção das argamassas. Assim, as cinzas foram moídas em um moinho de bolas (Figura 4.3 (a)), por aproximadamente 15 minutos. Esse processo foi realizado para que todo o material apresentasse tamanho inferior a 0,075 mm, uma vez que o foco foi na substituição parcial da massa de cimento Portland. (Figura 4.3 (b)).

(a) (b)

Figura 4.3 – Moídas em moinhas de bolas (a) Peneiramento após a moagem (b)

### *4.2.2 Moldagem das amostras*

Os corpos de prova (CP's) foram moldados com cimento Portland, CBCA, areia, água e aditivo superplastificante. O traço utilizado foi o de 1:3 (aglomerante/areia) com

relação água/cimento (a/c) = 0,5. O traço foi determinado conforme especificações para a argamassa padrão da norma NBR 7215/19. Apesar da relação a/c estipulada ser 0,475, decidiu-se arredondar o valor para 0,5. O aglomerante foi composto por 0%, 10%, 20% e 30% de substituição do cimento pela CBCA. Note que foram utilizados dois tipos de cinzas sedimentadas para a moldagem dos corpos de prova, a cinza de decantação superior e a cinza decantação inferior, ambas após queima e moagem. As proporções de misturas estão apresentadas na Tabela 4.5. Note que, as quantidades de massa correspondem a quantidade necessária para a produção de 12 corpos de provas (limitado pelo volume da cuba da argamassadeira).

Tabela 4.5 - Proporções das misturas

| **Amostra** | **Cimento (g)** | **Cinza Decantação Superior (g)** | **Cinza Decantação Inferior (g)** | **Areia (g)** | **Água (g)** | **Aditivo* (%)** |
|---|---|---|---|---|---|---|
| Referência | 420 | - | - | 1260 | 210 | 0,23 |
| 10% CS | 378 | 42 | - | 1260 | 210 | 0,50 |
| 20% CS | 336 | 84 | - | 1260 | 210 | 0,75 |
| 30% CS | 294 | 126 | - | 1260 | 210 | 1,00 |
| 10% CI | 378 | - | 42 | 1260 | 210 | 0,50 |
| 20% CI | 336 | - | 84 | 1260 | 210 | 0,75 |
| 30% CI | 294 | - | 126 | 1260 | 210 | 1,00 |
| * Porcentagem em massa de aglomerante (cimento + CBCA) | | | | | | |

A preparação da mistura começou com a mistura dos materiais secos por três minutos, seguida pela adição de metade da quantidade de água e uma nova mistura de um minuto. Posteriormente, adicionou-se o restante da água aditivada. A quantidade de aditivo utilizada foi determinada para se obter consistência de 250 mm ± 20 mm na Flow Table. A metodologia empregada no ensaio de espalhamento foi a da NBR 13276 (2016) (Flow table), no qual, a argamassa recém misturada foi vertida no molde padrão em formato de cone (Figura 4.4 a) e distribuída em três camadas. Cada camada é submetida a golpes específicos: 15, 10 e 5 respectivamente com o soquete, para simular a compactação da argamassa durante a fase de assentamento. Isso possibilita a determinação do índice de consistência após a remoção do cone (Figura 4.4 b), que sinaliza a fluidez da argamassa.

(a) (b)

Figura 4.4 – Ensaio de flow table (a) colocando a amostra no molde e (b) medição após 25 golpes

Os corpos de prova foram moldados em moldes cúbicos de 40 mm de aresta. Após 24 horas, as amostras foram desmoldadas e levadas para a cura submersa na temperatura ambiente (Figura 4.5 (a)) ou em autoclave (Figura 4.5 (b)). A cura submersa foi realizada com a imersão dos corpos de prova em solução saturada de hidróxido de cálcio. Em relação à cura em autoclave, os CP's foram colocados na autoclave e mantidas na temperatura de 220°C, com pressão de 2,1 atm, por 8 horas. Posteriormente, as amostras foram resfriadas dentro da autoclave por aproximadamente 12 horas (desligava-se a autoclave e no dia posterior retirava-se o material). Após esse procedimento, as amostras foram armazenadas em uma solução de hidróxido de cálcio até atingirem a idade de 28 dias.

(a) (b)

Figura 4.5 – Cura (a) submersa ou (b) em autoclave

### *4.2.3 Caracterização das amostras*

A metodologia estabelecida na NBR 9778/2005, que determina as massas seca, úmida e submersa, foi empregada para avaliar a porosidade e a absorção das argamassas. Depois do período de cura, que durou um total de 28 dias, as amostras foram pesadas em sua forma saturada e submersas (Figura 4.6).

Figura 4.6 – Pesagem da massa submersa

Para a obtenção da massa seca, os CP's foram secos em estufa (Figura 4.7), durante quatro dias a uma temperatura média de 40°C, até que a massa ficasse uniforme. Conforme a própria NBR 9778/2005, a temperatura para o teste é de 105°C, com uma margem de erro de 5°C. No entanto, no teste mencionado, as amostras, depois de secas a 40°C, foram mergulhadas na solução de acetona por um breve intervalo de tempo e armazenadas posteriormente no dessecador. A acetona atua como um agente de secagem, contribuindo para a secagem das amostras.

Figura 4.7 - Amostras secas em estufa

As amostras foram submetidas ao teste de resistência à compressão, sendo comprimidas axialmente até a sua ruptura. O equipamento utilizado no teste foi a Shimadzu (Figura 4.8), e com a velocidade de 0,45 cm/s.

Figura 4.8 – Máquina Shimadzu para o teste de compressão axial

A microestrutura das amostras foi examinada por meio de microscopia eletrônica de varredura (MEV) e difração de raios-X (DRX). O MEV foi utilizado para analisar a superfície das amostras, obtidas através do detector de elétrons retroespalhados (BSE). Para assegurar a condução das amostras, uma camada de carbono foi aplicada. A difração de raios-X (DRX) foi usada para examinar os produtos cristalinos resultantes da hidratação do cimento. As amostras em pó foram analisadas no equipamento PANalytical Empyrean com radiação CuKα de (k = 1,5406 Å), com 2θ oscilando entre 3,03° e 50°, a cada 0.06° por 3 segundos, com base no banco de dados do ICDD. Para a preparação, é necessário que o material esteja homogeneizado e disperso de maneira fina, de modo que preencha totalmente a cavidade do recipiente de amostra e fique alinhado com o plano superior do recipiente.

# 5 RESULTADOS E DISCUSSÕES

## 5.1 Caracterização dos resíduos queimados

### *5.1.1 Queima e perda de massa dos resíduos de cana-de-açúcar*

Quatro amostras de resíduos de cana-de-açúcar foram analisadas para avaliar suas propriedades técnicas. O primeiro resultado corresponde a perda de massa após a queima dos resíduos (Tabela 5.1). Observou-se que os bagaços coletados apresentaram perda de massa elevada, atingindo 96,90% no bagaço claro e 90,61% no bagaço escuro. Em contraste, os resíduos coletados nos tanques de decantação tiveram uma perda de massa cerca de três vezes menor, o que se deve ao fato de já terem sido submetidas a um processo prévio de queima na indústria para geração de energia. Além disso, verificou-se que o bagaço claro apresentou uma perda de massa superior à do bagaço escuro. Uma possível explicação para essa diferença é que o bagaço escuro pode ter sofrido uma leve decomposição da matéria orgânica antes do ensaio, possivelmente devido ao tempo de estocagem anterior à sua análise.

Tabela 5.1 - Perda de massa dos resíduos de bagaço de cana-de-açúcar após a queima (%)

| Cinza Decantada Inferior | Cinza Decantada Superior | Bagaço Claro | Bagaço Escuro |
|---|---|---|---|
| 33,61 | 27,41 | 96,90 | 90,61 |

### *5.1.2 Composição química após a queima de massa*

A composição química, obtida através da técnica de fluorescência de raios-X, dos materiais é mostrada na Tabela 5.2. Observa-se que o cimento é majoritariamente formado por CaO e $SiO_2$, seguido por $Al_2O_3$ e $Fe_2O_3$, conforme previsto. No que diz respeito às cinzas, produzidas após a queima em laboratório, estas apresentaram $SiO_2$, $Al_2O_3$, $Fe_2O_3$ como principais óxidos, com o silício ocupando a maior parte, seguido pelo alumínio e pelo ferro, respectivamente. Ao comparar os resultados das cinzas, nota-se que todos têm uma somatória de óxidos majoritários acima de 80%, com a única exceção do bagaço claro que apresentou uma soma inferior a 80%. Conforme a norma NBR 12653/2015, é necessário que a soma dos óxidos majoritários

exceda 80%, embora essa não seja a única característica para serem classificados como pozolânicos.

Tabela 5.2 - Composição química (%) do cimento Portland, da Sílica ativa e da CBCA

| Material | CaO | $SiO_2$ | $Al_2O_3$ | $Fe_2O_3$ | $TiO_2$ | $P_2O_5$ | $K_2O$ | MgO | {P}* |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Cimento | 56,47 | 24,59 | 7,19 | 4,05 | 0,25 | 0,12 | - | 2,43 | - |
| CBCA Inferior | 3,83 | 53,77 | 18,71 | 14,99 | 1,86 | 1,31 | 4,93 | - | 87,47 |
| CBCA Superior | 4,79 | 53,25 | 16,73 | 14,36 | 1,81 | 1,89 | 6,18 | - | 84,34 |
| CBCA Bagaço Claro | 6,87 | 41,63 | 19,02 | 16,75 | 1,89 | 1,39 | 9,67 | - | 77,40 |
| CBCA Bagaço Escuro | 7,65 | 44,20 | 19,92 | 17,98 | 2,53 | 1,05 | 5,20 | - | 82,10 |
| * {P} = $SiO_2$ + $Al_2O_3$ + $Fe_2O_3$ | | | | | | | | | |

### *5.1.3 Difração de Raios-X*

Na Figura 5.1 estão apresentados os difratogramas das cinzas obtidas após o processo de queima em laboratório. O quartzo é o principal elemento, com pico característico de alta intensidade na posição aproximada 2θ = 26°, em todas as amostras. Porém se atenta para as amostras das CBCA superior e inferior, respectivamente, onde se observa picos maiores de quartzo, sendo a CBCA superior com o maior pico.

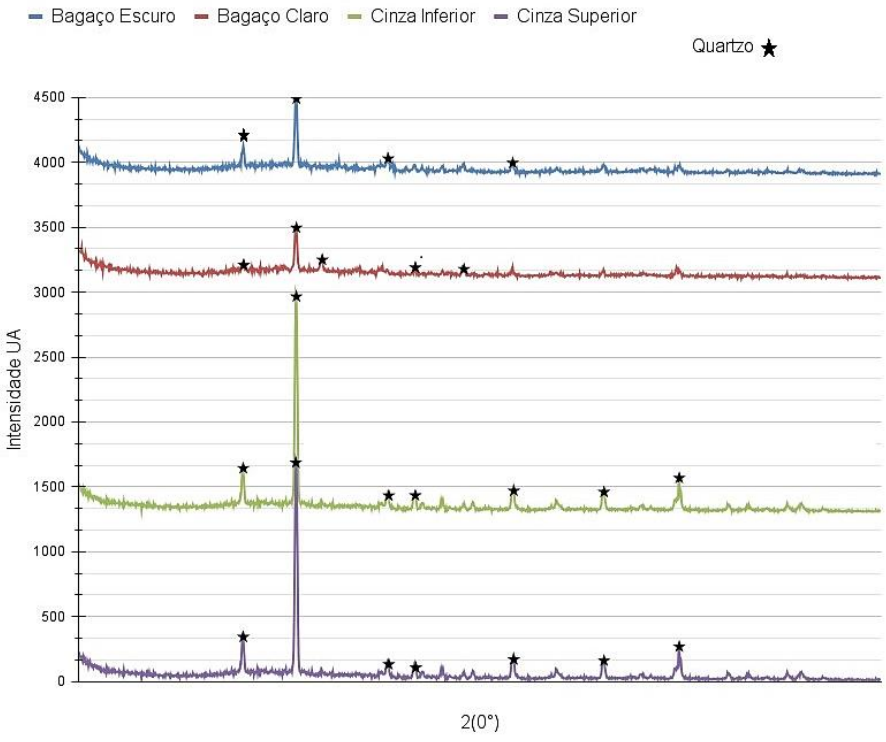


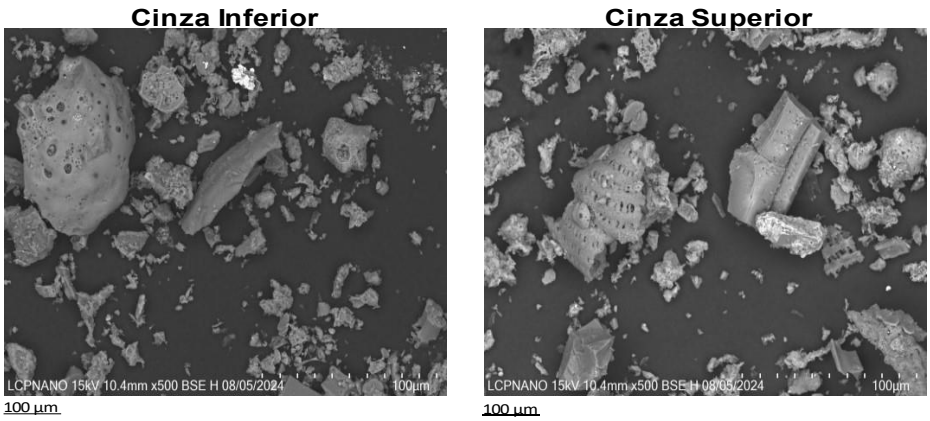

Figura 5.1 – Difratogramas das amostras das CBCA obtidas a partir da queima das cinzas decantadas superior e inferior e dos bagaços claro e escuro

### *5.1.4 Morfologia*

Pode-se observar na Figura 5.2 que a cinza decantada inferior *in natura* apresentou uma coloração e tamanho diferente em comparação a cinza decantada superior. Enquanto a cinza *in natura* inferior apresenta grãos aparentemente finos, a cinza *in natura* superior apresenta uma granulometria com grãos maiores e finos misturados na amostra. Já quando queimadas a 600°C, ambas as CBCAs apresentaram uma coloração e aspectos idênticos.

Figura 5.2 - Amostras das cinzas inferior e superior *in natura* a após a queima a 600°C

Observa-se na Figura 5.3 imagens de MEV das cinzas de decantação inferior e superior, após queima a 600°C. Nas cinzas inferior (a) e superior (b) é observada a presença de partículas fibrosas e porosas, além de partículas angulosas e mais lisas e de tamanhos variados. As partículas fibrosas são provenientes da estrutura da própria cana-de-açúcar, ao passo que as partículas mais lisas são características de compostos cristalinos, como o quartzo por exemplo.




(a) (b)

Figura 5.3 – Micrografias das cinzas após queima a 600°C: (a) inferior e (b) superior

Foi realizado mapas de composição química das imagens apresentadas na Figura 5.3. Assim, a Figura 5.4 está relacionada com a cinza inferior e a Figura 5.5 com a cinza superior. Como o esperado, as partículas mais lisas são ricas em Si, justamente por causa do quartzo. Note que, as cinzas apresentaram picos bem característicos de quartzo no difratograma (Figura 5.1). As partículas fibrosas e porosas são compostas por Si, Al e K, predominantemente.

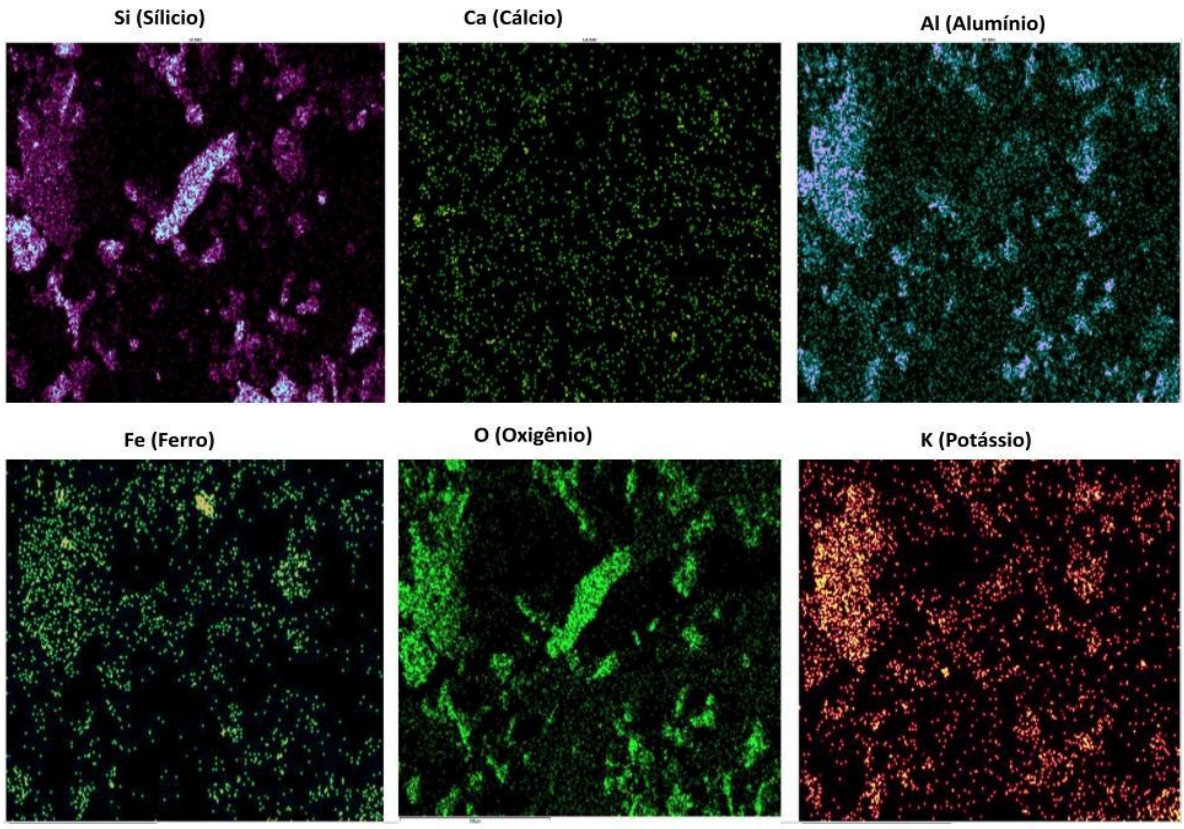



Figura 5.4 – Mapa de composição química da cinza de decantação inferior após queima a 600°C

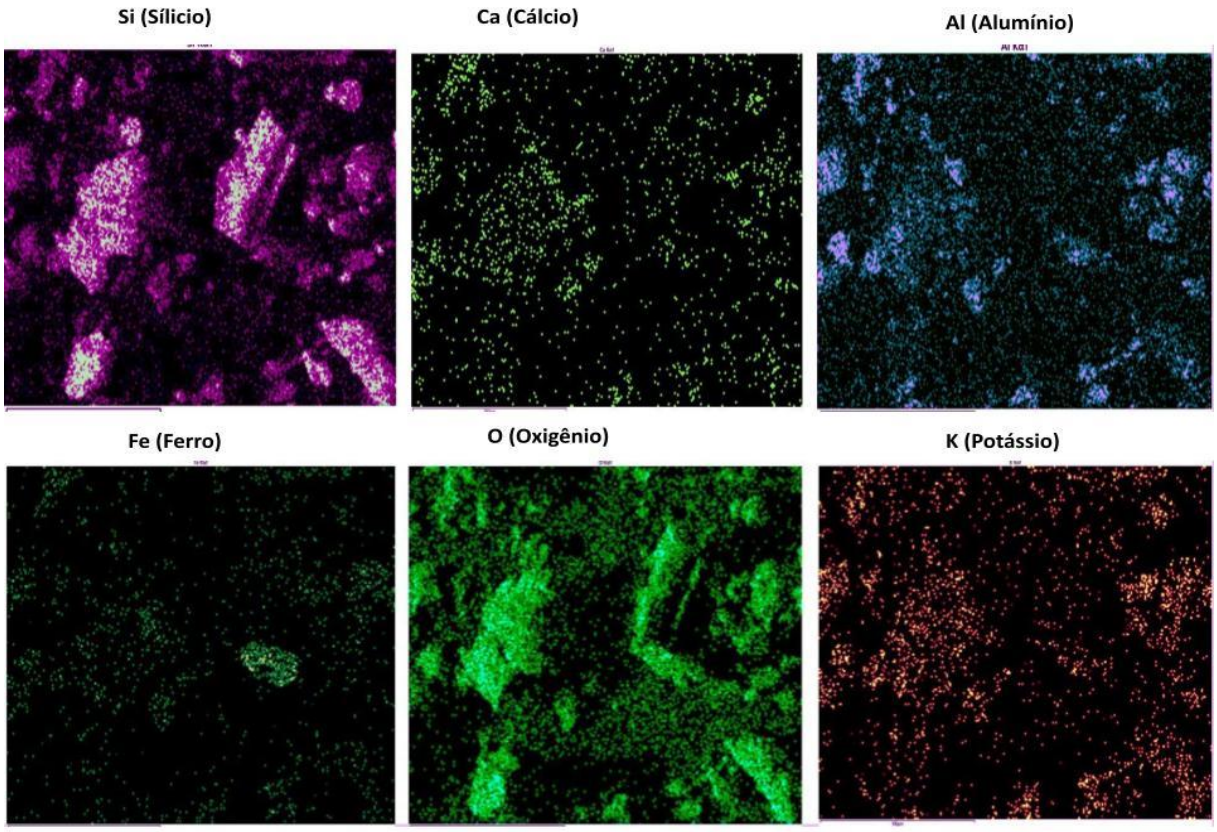
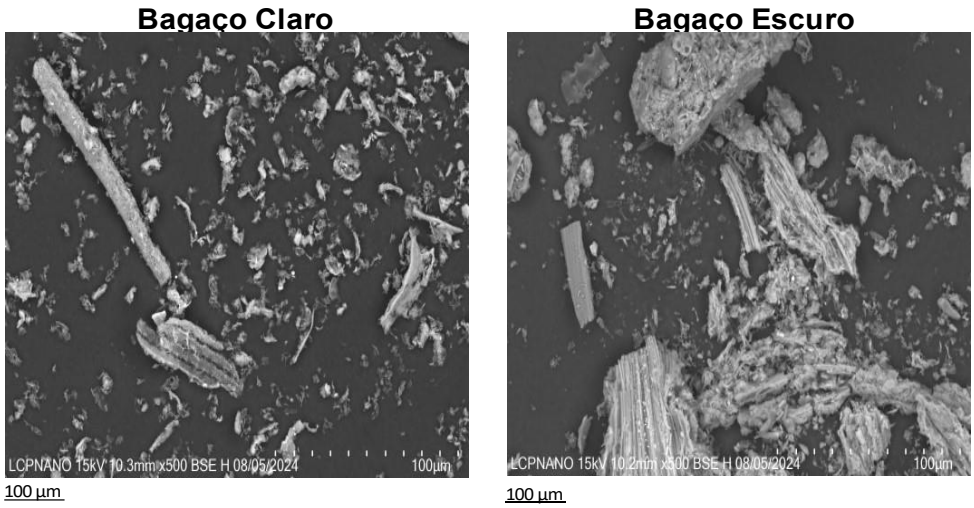



Figura 5.5 - Mapa de composição química da cinza de decantação superior após queima a 600°C

Imagens dos bagaços coletados em sua forma natural e após a queima nas temperaturas de 300°C e de 600°C estão apresentados na Figura 5.6. O bagaço claro e o bagaço escuro possuem características bem semelhantes, com textura e granulometria bem próximas ao olho nu. Os bagaços, tanto o claro quanto o escuro, queimados a 600°C apresentaram-se uma coloração idêntica entre si, e com uma textura próxima.

Para melhor visualização da morfologia das partículas dos bagaços após a queima a 600°C, foi utilizado microscópio eletrônico de varredura Figura 5.7. Nota-se no bagaço claro a presença de estruturas fibrosas e porosas, além de partículas angulosas e mais lisas de tamanhos variados. Isso também pode ser observado no bagaço escuro que possui algumas fibras mais irregulares também de tamanhos variados, possuindo mais irregularidades do que o bagaço claro.

Figura 5.6 - Amostras dos bagaços *in natura* e após a queima a 300°C e 600°C




(a) (b)

Figura 5.7 - Micrografias dos bagaços após queima: (a) claro e (b) escuro

Os mapas de EDS também foram realizados nos bagaços claro e escuro (Figura 5.8 e Figura 5.9). Assim como observado nas amostras das cinzas de caldeira

as partículas mais lisas são ricas em Si e O, sendo atribuídas a sílica cristalina na forma de quartzo. Comparando as observações dos bagaços e das cinzas, pode-se deduzir que os bagaços ao serem queimados, obtiveram características visuais próximas aos das cinzas previamente queimadas na sucroalcooleira.

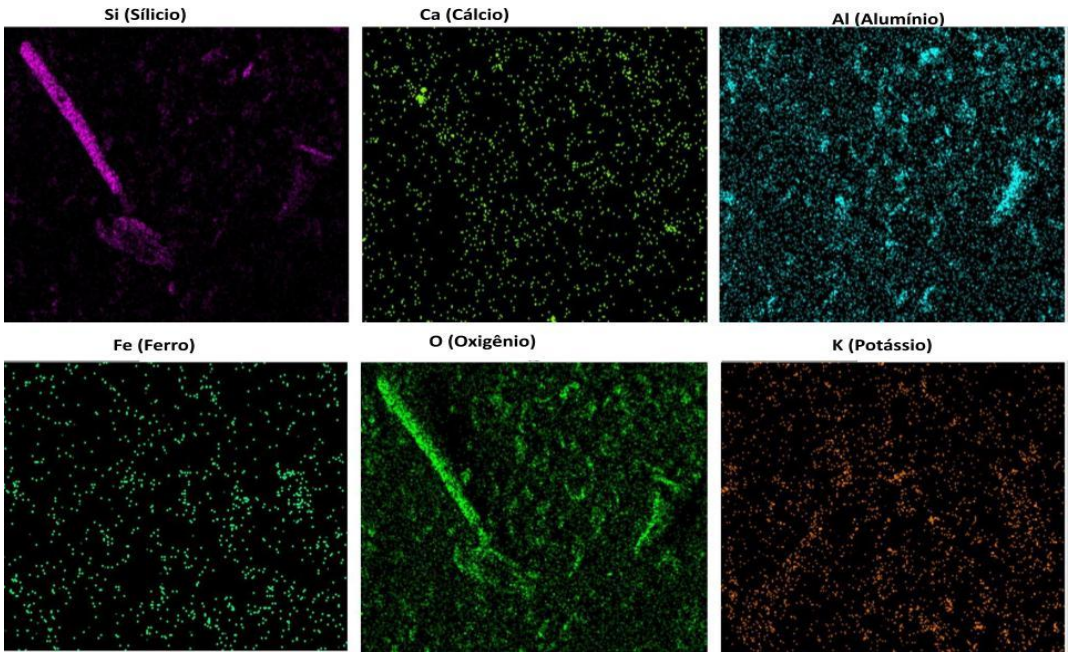



Figura 5.8 - Mapa de composição química do bagaço claro após queima a 600°C

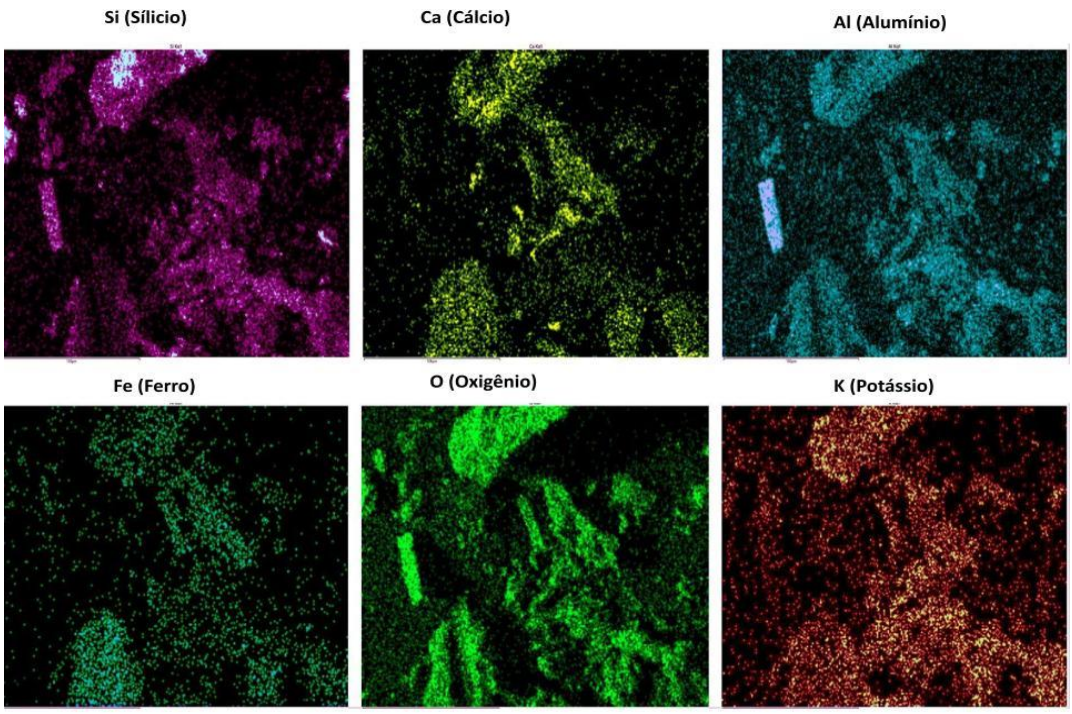



Figura 5.9 - Mapa de composição química do bagaço escuro após queima a 600°C

### *5.1.5 Análise Granulométrica*

As curvas granulométricas dos quatro tipos de cinzas, obtidas após a queima das cinzas decantadas e dos bagaços, estão apresentadas na Figura 5.10. Os resultados mostram que a CBCA obtida a partir do bagaço escuro apresenta maior número de partículas maiores. No entanto, observa-se uma maior proporção de partículas menores que 0,15 mm na CBCA do bagaço escuro, quando comparada à do bagaço claro. Isso sugere que a CBCA do bagaço escuro apresenta uma granulometria mais contínua. Com relação as CBCA obtidas a partir das cinzas decantadas, ambas apresentam granulometria similar entre si. Ao mesmo tempo, elas são mais finas do que a CBCA obtida a partir dos bagaços. A maior proporção de partículas mais grossas na CBCA dos bagaços pode estar relacionada à preservação de estruturas fibrosas da cana-de-açúcar.

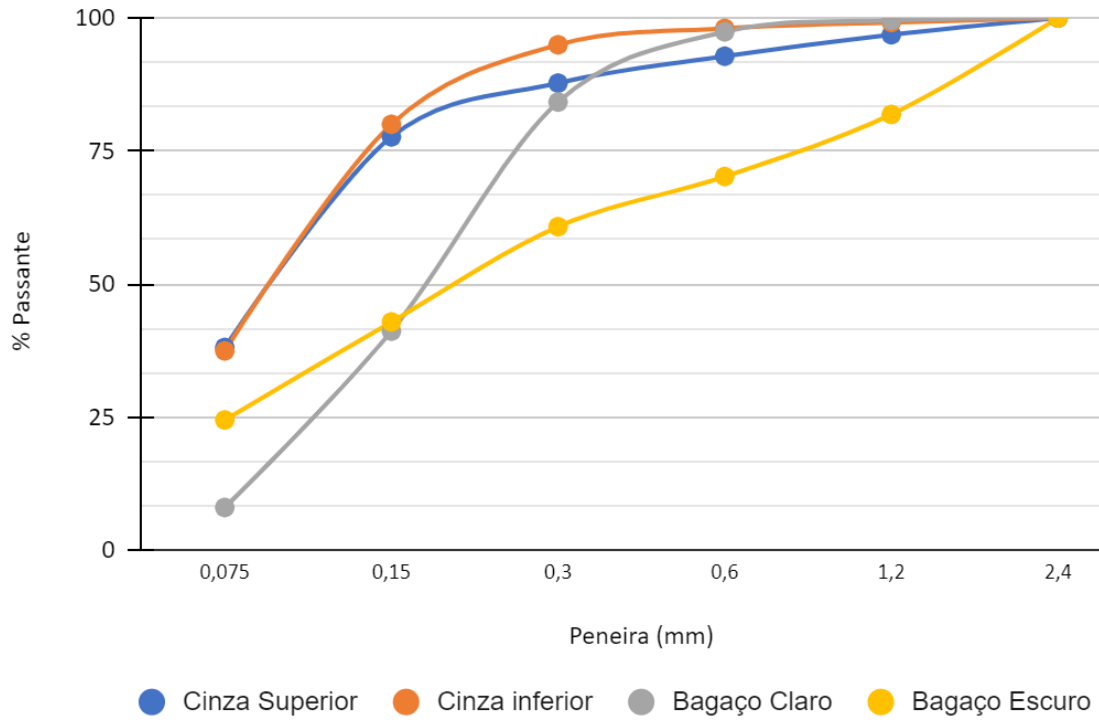



Figura 5.10 - Análise granulométrica das cinzas e dos bagaços

### *5.1.6 Ensaio de reatividade por meio de condutividade elétrica*

Foram realizados os testes de variação da condutividade elétrica dos quatro tipos de CBCA obtidos a partir da queima das cinzas de decantação e dos bagaços.

Os resultados para as cinzas de decantação estão apresentados na Figura 5.11. Observa-se que tanto a cinza superior com a inferior possui curvas de variação de condutividade elétrica similares. Contudo, a cinza superior demonstrou perda de condutividade menor, em relação a cinza inferior. Embora a granulometria das duas cinzas seja bastante semelhante, a CBCA superior apresenta um maior teor de partículas mais grosseiras, o que pode explicar sua menor reatividade em comparação com a CBCA inferior.

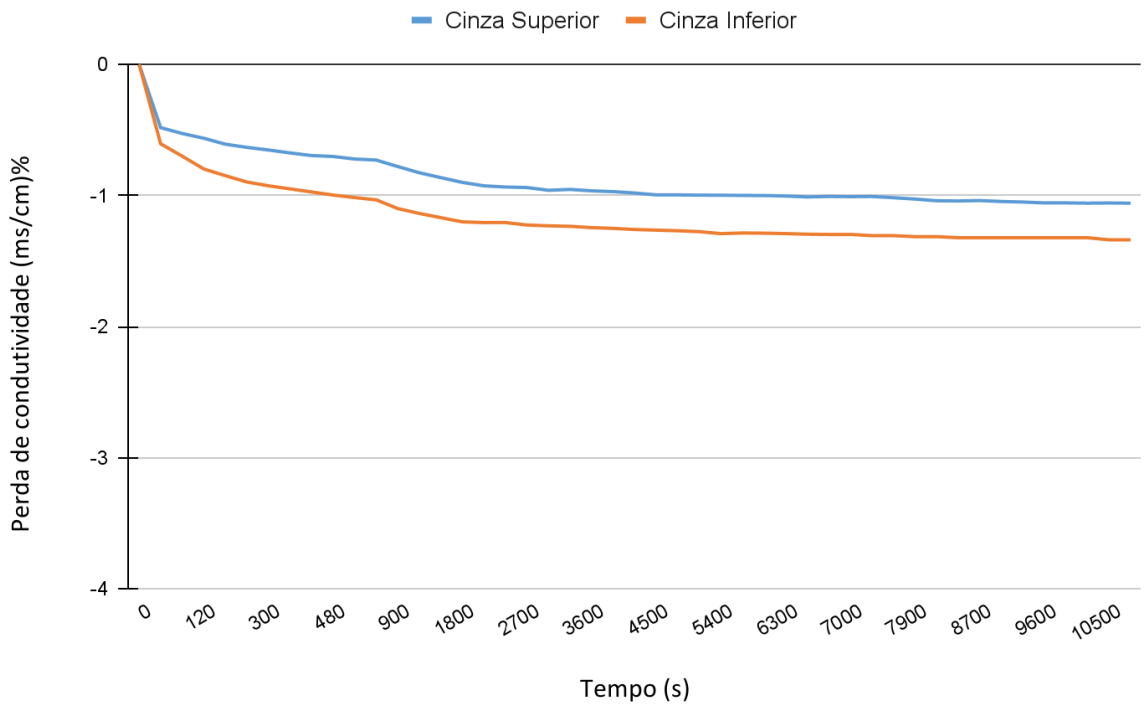



Figura 5.11 - Teste de variação de condutividade elétrica das cinzas de decantação

Com relação a variação de condutividade elétrica dos bagaços queimados (Figura 5.12), foi demonstrado que esses materiais apresentaram reatividade química maior do que as cinzas decantadas queimadas. Além disso, observa-se a mesma tendência de variação de condutividade elétrica tanto para a bagaço claro como para o escuro. Note que, mesmo as cinzas sendo mais finas, elas apresentaram reatividade menor. Isso é devido a alta cristalinidade das cinzas e dos bagaços utilizados, conforme são demonstrados pelos grandes picos de quartzo, além da presença de outros picos cristalinos, como vistos nos difratogramas da Figura 5.1.

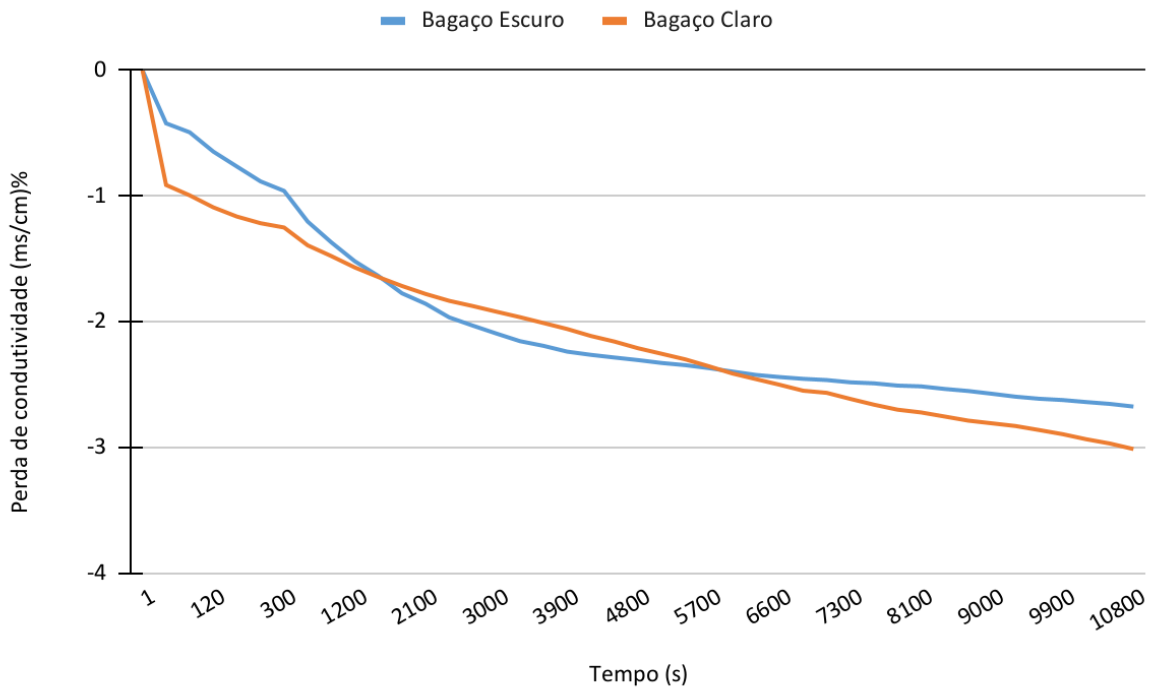



Figura 5.12 – Teste de variação de condutividade elétrica dos bagaços

### *5.1.7 Escolha do tipo de resíduo*

A CBCA é uma mistura complexa de compostos inorgânicos, no qual há uma heterogeneidade desses materiais devido à composição variada dos minerais presentes no solo onde a cana foi cultivada, bem como às condições específicas de processamento (XAVIER,2019). As cinzas podem conter uma variedade de elementos, como potássio, cálcio, magnésio, sílica e metais traços, que influenciam sua cor e propriedades físicas. A distribuição desses elementos na cinza pode ser afetada por fatores como temperatura de queima, velocidade do processo e presença de impurezas, o qual resulta em diferentes tonalidades de cinza, desde tons mais claros até mais escuros, refletindo a diversidade de composição e processamento do bagaço de cana-de-açúcar (PAULA, 2009). Além da sua composição mineral variada, a heterogeneidade na CBCA pode ser influenciada por fatores como a localização geográfica da plantação, o tipo de solo e as práticas agrícolas (Basu *et al.*, 2009).

Embora os bagaços apresentaram maior reatividade química, provavelmente por causa da menor cristalinidade desses materiais, as suas grandes perdas de massa inviabilizariam a obtenção do material necessário para a moldagem das argamassas.

Com base nos resultados obtidos, conclui-se que as cinzas decantadas são mais viáveis para a moldagem das argamassas.

Há algumas formas de aumentar a reatividade a CBCA, sendo o principal deles controlar a temperatura de queima a fim de garantir que o carbono contido no material orgânico seja liberado em forma de gás, e que a sílica permaneça no estado amorfo. Além do controle da temperatura, pode-se utilizar o aumento do tempo de moagem das cinzas, para aumentar a sua área superficial (VASCONCELOS, 2013). Sendo assim, as cinzas foram moídas em moinhos de bolas para apresentar tamanho menor do que 0,075 mm, uma vez que a CBCA foi utilizada como substituição da massa de cimento.

## 5.2 Caracterização das argamassas

Essa seção corresponde aos resultados obtidos para as argamassas moldadas no traço de 1:3 (cimento: areia), fator água/aglomerante de 0,5 e com 0, 10, 20 e 30% de substituição parcial da massa de cimento Portland por CBCA. Como dito antes, as CBCAs utilizadas foram obtidas a partir da queima e moagem das cinzas decantadas. Foram utilizados dois tipos de curas diferentes: cura saturada na temperatura ambiente e cura em autoclave. Os resultados serão descritos a seguir.

### *5.2.1 Difração de raios-X*

Os difratogramas das argamassas moldadas com a CBCA, obtida a partir da cinza decantada inferior, e com diferentes condições de cura estão apresentados na Figura 5.13. Nas amostras com cura saturada (Figura 5.13 (a)), observa-se queda gradual dos picos característicos de portlandita (hidróxido de cálcio), $2\theta \sim 18{,}08°$ e 34,11°, com o aumento do teor de CBCA. Isso pode ser explicado devido a redução da quantidade de cimento, uma vez que o hidróxido de cálcio é um produto de hidratação. Ao mesmo tempo, observa-se a presença de picos característicos de quartzo nas amostras com cinza. Os produtos de hidratação do cimento, etringita, monosulfato de cálcio hidratado e silicato de cálcio hidratado (C-S-H) e a calcita foram observados em todas as amostras.

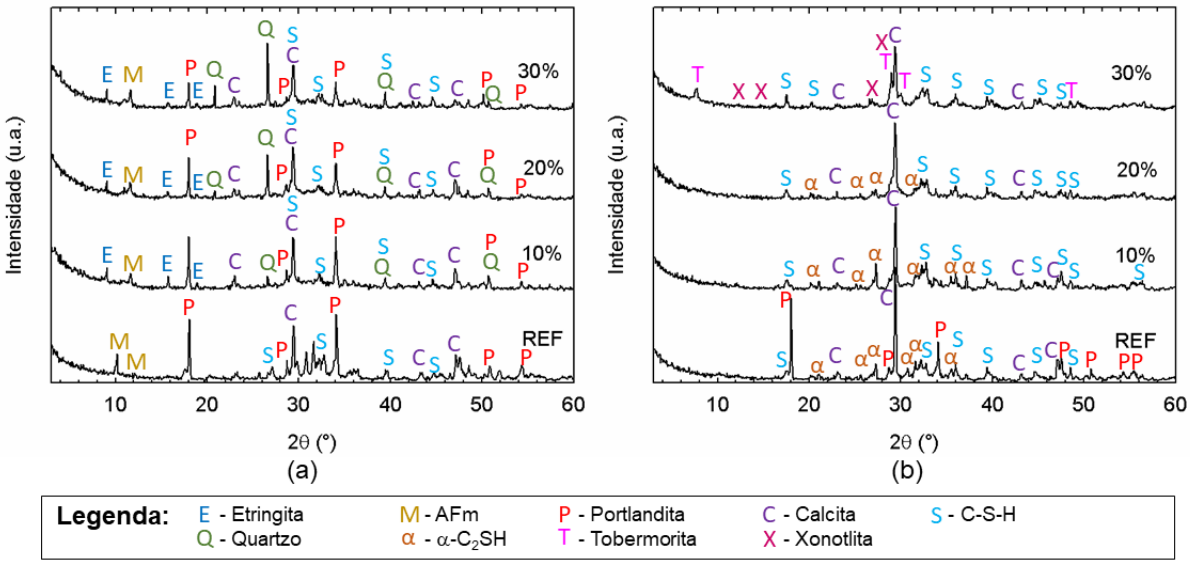



Figura 5.13 – Difratograma da CBCA inferior com cura saturada (a) e cura em autoclave (b)

Os resultados dos difratogramas demonstram que as CBCA inferior em cura saturada levaram à formação de C-S-H, porém observa-se picos de quartzo principalmente na amostra de 20%, demonstrando que as CBCA possuem também um caráter cristalino, semelhante ao obtido por Soares *et al.*, (2016).

Nas amostras submetidas à cura em autoclave (Figura 5.13 (b)), nota-se um crescimento dos produtos de hidratação (C-S-H, tobermolita e Xonotlita), uma diminuição da portlandita e a ausência da fase AFm. Isso acontece, pois, a cura em autoclave acelera o processo de hidratação do cimento e as reações pozolânicas (GARCIA, 2019).

A presença do pico de hidróxido de cálcio não foi observada nas amostras com cinza, devido à ausência do pico característico no ângulo 2θ =18,08° e 34,11°. Além disso, nota-se ausência de picos de quartzo nas amostras com CBCA. Isso indica que o quartzo presente na CBCA está reagindo com $Ca^{2+}$, formando mais C-S-H (GARCIA,2019). Observa-se a presença de α-$C_2SH$ nas amostras com REF, CIA 10% e CIA 20%. Em contrapartida, na amostra CIA 30%, nota-se a presença de tobermolita e xonotlita. Essas três fases só são formadas em materiais cimentícios submetidas a cura em autoclave. A fase α-$C_2SH$ é uma fase rica em Ca, sendo responsável por deixar a matriz cimentícia mais porosa e consequentemente com menor resistência mecânica (HONGWEI, 2021).

Por outro lado, as fases tobermorita e xonotlita são cristais de silicato de cálcio hidratado com baixa relação Ca/Si, com valores de 0,83 e 1,0, respectivamente (TAM

TAM, 2012). Essas fases só são formadas com a utilização de uma fonte rica em silício, uma vez que o cimento tem mais cálcio (YAZICI *et al.*,2013). Além disso, a formação delas é considerada vantajosa, pois geralmente elas crescem em poros, densificando a microestrutura e aumentando a resistência mecânica de materiais cimentícios.

Os difratogramas das amostras moldadas com a cinza superior com diferentes condições de cura estão mostrados na Figura 5.14. Os difratogramas das amostras moldadas com cinza superior são similares aos observados nas amostras com cinza inferior, demostrando a mesma tendência e produtos formados.

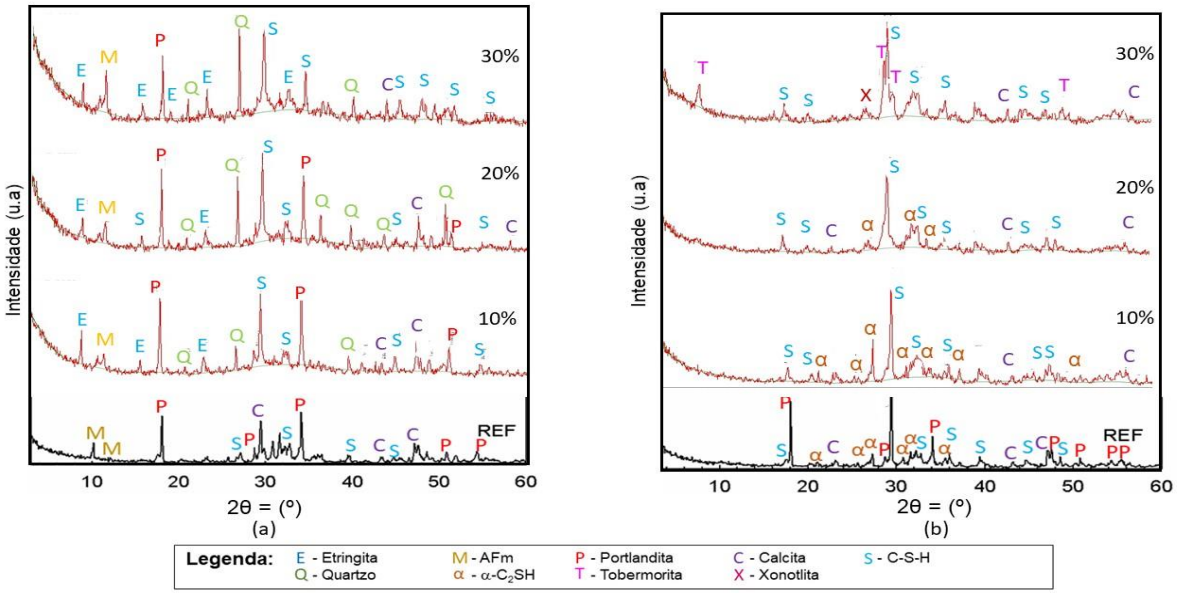



Figura 5.14 – Difratograma da CBCA superior com cura saturada (a) e cura em autoclave (b)

### *5.2.2 Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV)*

Na Figura 5.15 estão apresentadas imagens do MEV das argamassas moldadas com a CBCA, proveniente das cinzas decantadas inferior, e com cura saturada (S) e cura em autoclave (A). As imagens foram realizadas em poros para a visualização da morfologia dos cristais hidratados. Na amostras10% CIS é possível observar a presença de cristais finos e alongados, sendo característicos da etringita. Na amostra 20% CIS nota-se a presença de C-S-H, composto por morfologia irregular e fibrosa. Cristais hexagonais são visíveis na amostra com 30% CIS. É importante ter em mente que, essas imagens são ilustrativas dos cristais nos poros.

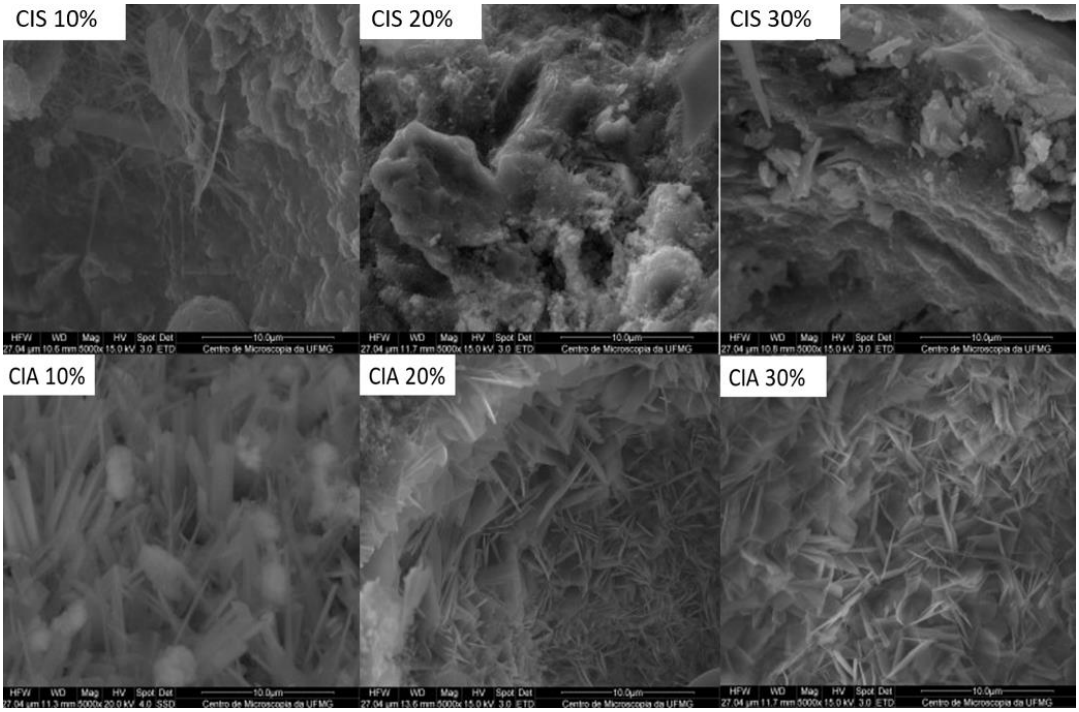



Figura 5.15 – Imagens do MEV da Cinza Inferior com cura Saturada (CIS) e cura em Autoclave (CIA)

Com relação a morfologia dos cristais hidratados presentes nas amostras com cura em autoclave, estes se apresentam com formatos de placas, agulhas ou mais cúbicos. As placas formadas são características dos cristais de tobermorita, devido a adição da cinza de bagaço de cana-de-açúcar, ao passo que, as agulhas foram atribuídas a xonotlita. Ambos cristais são formados em temperaturas mais altas e quando são adicionadas fontes externas de silício (GARCIA, WANG, FIGUEIREDO, 2018). Com relação as partículas em formato cúbico, visíveis na amostra 10% CIA, estes são atribuídos ao carbonato de cálcio. Isso pode ter acontecido devido a menor quantidade de Si e maior quantidade de Ca na matriz cimentícia.

Na Figura 5.16 estão apresentadas imagens do MEV das argamassas moldadas com as cinzas superiores, às que passaram pela cura saturada e pela cura em autoclave. As considerações são similares as observadas nas imagens da CBCA inferior (Figura 5.15). Assim, é possível observar a presença de C-S-H com estrutura fibrosas e placas de hidróxido de cálcio nas amostras curadas na temperatura ambiente, ao passo que, cristais de xonotlita, tobermorita só foram identificadas após a cura em autoclave.

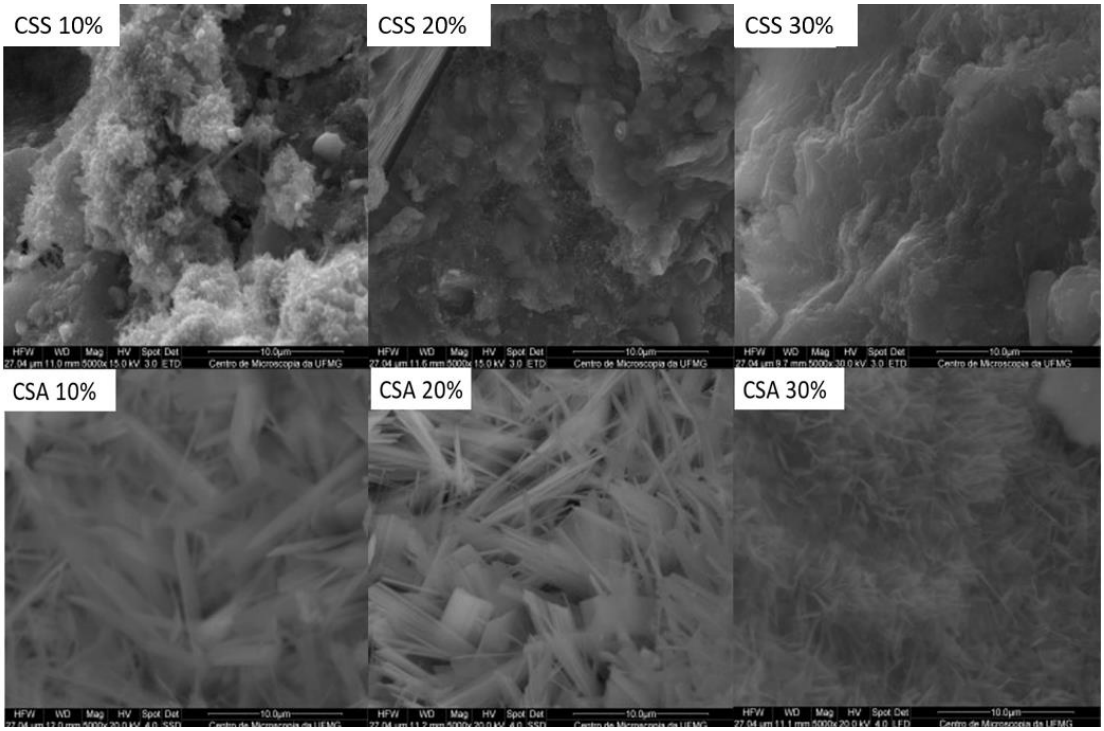



Figura 5.16 – Imagens do MEV da Cinza Superior com cura Saturada (CSS) e cura em Autoclave (CSA)

Conforme observado nas imagens de MEV, as argamassas apresentam partículas com diferentes morfologias e distribuições. Sabe-se que, fatores como forma, tamanho, distribuição e textura das partículas influencia diretamente a conectividade entre os grãos e afetando a adesão entre as fases sólidas. Consequentemente, isso impacta diretamente a resistência mecânica e a durabilidade do material (METHA e MONTEIRO, 2014).

### *5.2.3 Porosidade e absorção de água*

Na Figura 5.17 estão apresentados os resultados obtidos da média da porosidade dos seis corpos de prova de cada condição. A amostra referência apresentou porosidade de 6,72 ± 1,10% para cura normal e 15,63 ± 0,73% para cura em autoclave. A Figura 5.17 também mostra a porosidade para as amostras com CBCA. Observa-se uma leve tendência de queda da porosidade devido a utilização da CBCA. Isso pode ter acontecido por causa do empacotamento de partículas. Com relação a cura em autoclave, a porosidade das argamassas também aumentou quando comparadas a cura saturada.

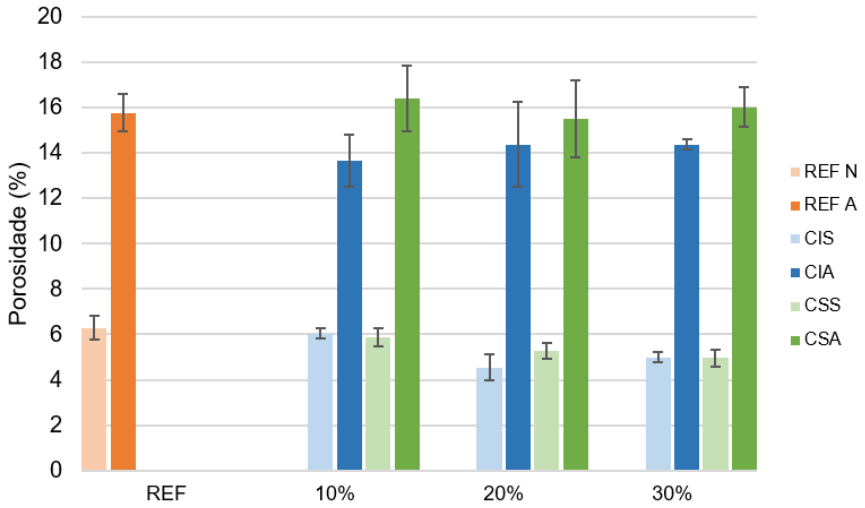



Figura 5.17 – Média das Porosidades dos CP`s (%)

Em paralelo obteve-se também os valores da média da absorção por imersão dos corpos-de-prova (Figura 5.18), no qual se observa os valores baixos de absorção para as amostras quando submetidas à cura normal, tanto a cinza superior quanto a inferior. Já quando submetida a cura em autoclave, observa-se valores maiores.

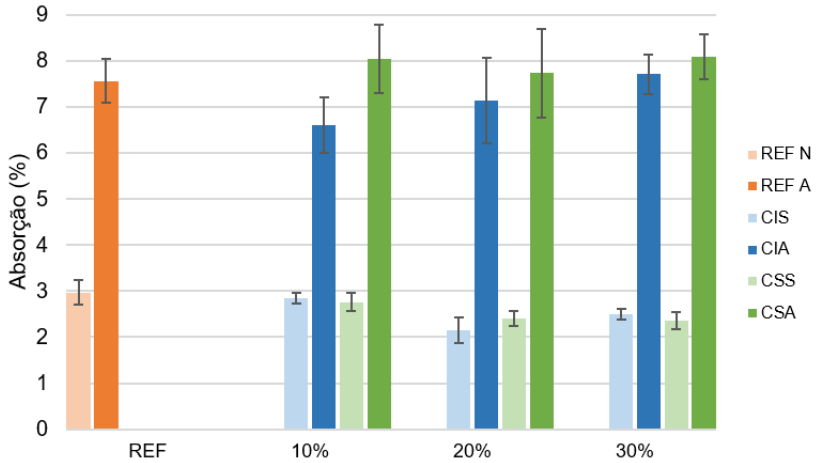



Figura 5.18 – Média da Absorção d'água dos CP`s (%)

De acordo com os resultados, é possível observar a tendência de aumento da absorção de água por imersão com a porosidade das amostras. A absorção d'água é afetada pela estrutura dos poros, sua distribuição e interconexão. Com isso, mesmo que uma amostra tenha maior porosidade, a sua absorção d'água pode ser menor se os poros forem menos efetivos na retenção de água devido à sua estrutura ou tipo (METHA e MONTEIRO, 2014). A distribuição dos poros nas amostras com a cinza

inferior e com a cinza superior está apresenta nas Figura 5.19 e Figura 5.20, respectivamente. Nas imagens é possível observa a presença de poros bem grandes e de tamanho macro em todas as condições, assim como vários poros menores. No entanto, não é observada uma alteração significativa do formato, tamanho e distribuição dos poros devido aos diferentes teores de CBCA.

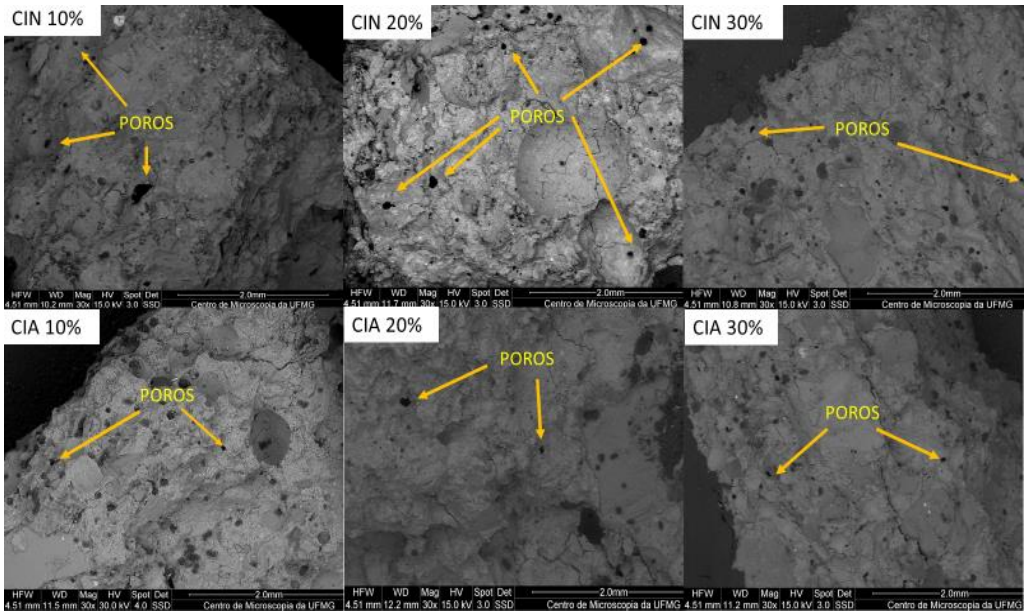



Figura 5.19 – Poros dos CP`s Inferior autoclavados e saturadas

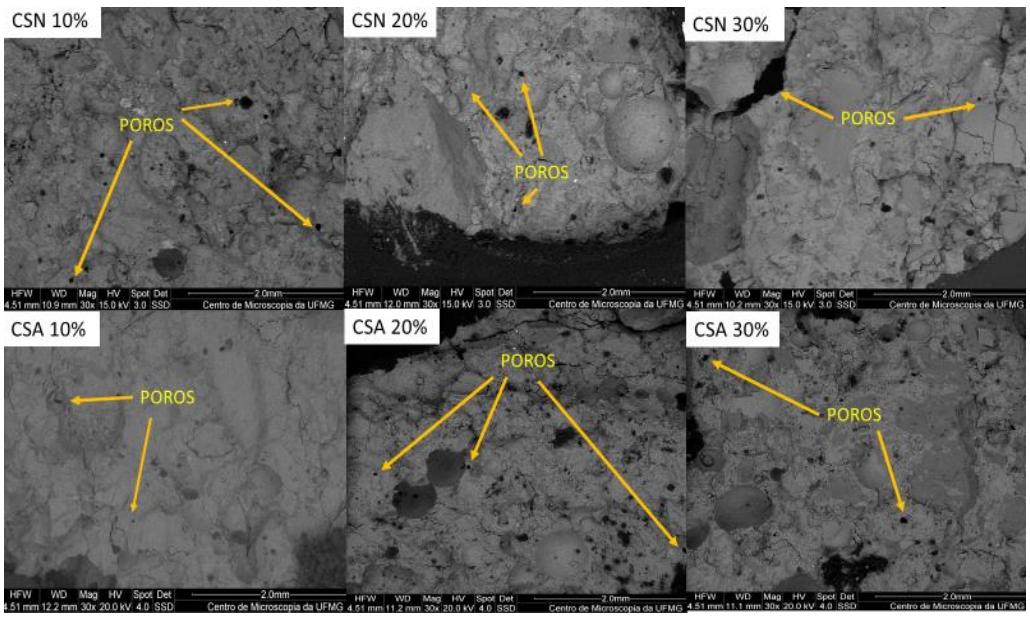



Figura 5.20 – Poros dos CP`s Superior autoclavados e normais

### *5.2.4 Resistência à Compressão*

Na Figura 5.21 estão apresentados os resultados da média da resistência à compressão dos seis corpos de prova para cada traço utilizado. Partindo do valor de referência, obteve-se uma tensão média de 49,12 ± 3,87 MPa com cura saturada (CS) e 39,95 ± 4,45 MPa com cura em autoclave (CA). A utilização da CBCA sob cura saturada resultou em uma redução de aproximadamente 15% na resistência à compressão. No entanto, não foram observadas variações significativas em função dos diferentes teores utilizados de cinzas utilizadas.

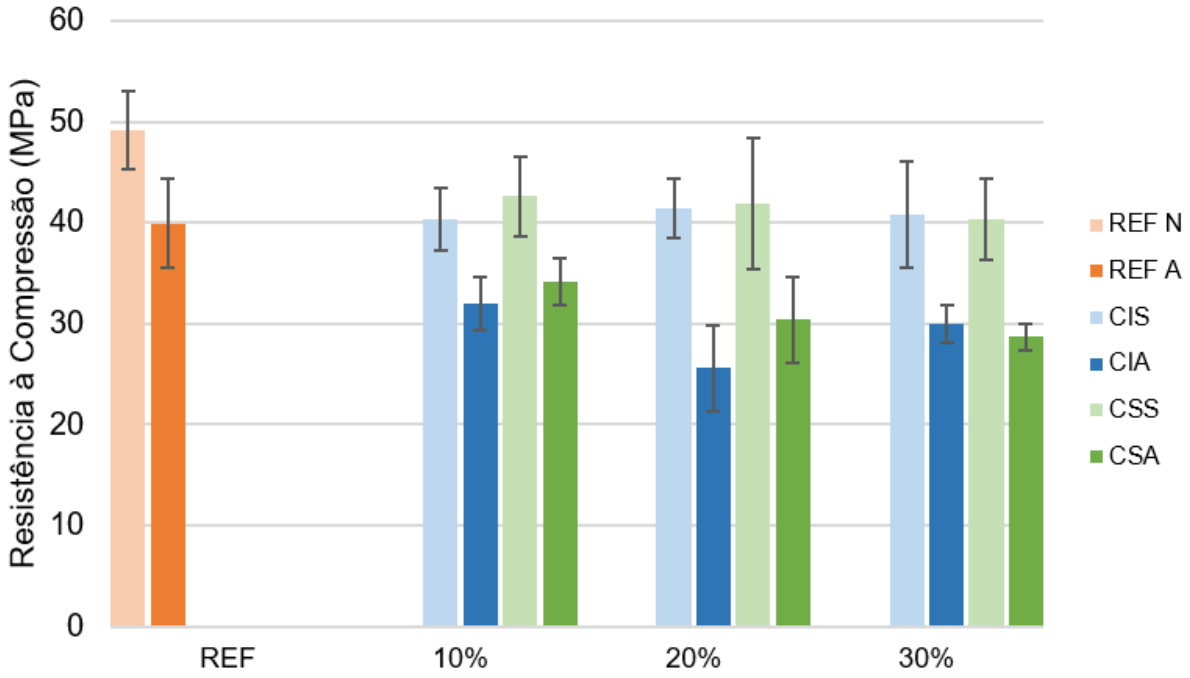



Figura 5.21 – Média das Resistências à compressão dos corpos-de-prova (MPa).

Uma possível explicação para a redução da resistência mecânica está relacionada à substituição de parte do material cimentício por um resíduo com baixa reatividade (JAGADESH, 2023). Por outro lado, mesmo com a redução no teor de cimento, a resistência não variou de forma expressiva entre os diferentes teores de CBCA, o que pode ser atribuído ao melhor empacotamento das partículas na matriz. Assim, como a amostra 30% CIS apresentou uma leve queda de resistência em comparação com as outras condições, a quantidade ideal para usar CBCA com cura saturada foi escolhida como 20%. Isso está de acordo com os resultados de Paula *et*

*al.* (2009), que ao analisarem o potencial da CBCA como substituto parcial do cimento, concluíram que este pode substituir o teor de 13 a 20%. Também Fernandes *et al.*, (2015) obteve na proporção de 20% o maior valor de resistência à compressão.

No que diz respeito à cura em autoclave, nota-se uma diminuição na resistência à compressão em todas as condições. Isso já era esperado para a amostra de referência, uma vez que essa amostra não apresenta adição de Si. Segundo Yazici *et al.,* (2013) e Garcia, Wang e Figueiredo (2018), a autoclave requer uma fonte externa de silício (Si) para prevenir a formação de fases prejudiciais que reduzem a resistência mecânica (α-$C_2SH$). Isso pode explicar a redução da resistência à compressão das amostras com 10% e 20% de CBCA. Contudo, embora α-$C_2SH$ não foi observado na amostra com 30% foi observada também queda de resistência à compressão.

Uma explicação para isso foi o aumento da porosidade e consequentemente a queda da resistência à compressão. Esse aumento da porosidade devido a autoclave pode ter levado a formação excessiva de silicato de cálcio hidratado com alto grau de cristalinidade. Embora, na literatura é comum associar a formação de α-$C_2SH$ como uma fase maléfica, enquanto a tobermorita é associada a resistências mecânicas mais altas (GARCIA et al., 2023), esses cristais podem aumentar a permeabilidade e reduzir a capacidade de coesão quando formados de maneira excessiva. Isso pode ser observado nas amostras de MEV (Figura 5.15 e Figura 5.16), no qual fica claro que o excesso dos cristais deixou a matriz menos densa. Assim, de acordo com Yazici, Deniz e Baradan (2013) existe uma relação ótima entre a formação de C-S-H com caráter menos cristalino com as fases de alto grau de cristalinidade (tobermorita e xonotlita).

O que pode ter contribuído para a formação excessiva de fases de silicato de cálcio hidratado com alto grau de cristalinidade foi a relação água/aglomerante de 0,5. De acordo com (GARCIA et al., 2023), relação água/cimento mais altas levam a formação excessiva de xonotlita e tobermorita e diminuem a resistência à compressão e aumentam a porosidade.

Além disso, em temperaturas mais elevadas, pode haver uma maior expansão térmica da CBCA (ANJOS, 2013), o que potencialmente aumenta sua porosidade. Isso poderia, em teoria, permitir que mais água seja absorvida, embora a relação exata possa depender da estrutura específica da cinza e de como ela interage com a água.

# 6 CONCLUSÃO

Essa presente pesquisa teve como objetivo avaliar a influência da utilização da cinza do bagaço de cana de açúcar (CBCA) na microestrutura de compostos cimentícios com cura em autoclave. Para isso, a pesquisa foi dividida em duas etapas, sendo a primeira para avaliar a heterogeneidade de diferentes CBCA coletadas, e a segunda referente a moldagem e caracterização de argamassas com CBCA e cura em autoclave.

Para caracterizar as CBCA foram analisados a perda de massa após a queima, composição química, DRX, morfologia, granulometria e reatividade química por meio do ensaio de condutividade elétrica. As cinzas coletadas nas bacias de decantação foram escolhidas como as mais viáveis para moldar as argamassas. Isso, pois, apesar das cinzas obtidas em laboratório a partir de bagaços coletados apresentarem maior reatividade química, a elevada perda de massa (> 90%) inviabiliza a obtenção de grandes volumes de material. Além disso, as cinzas decantadas apresentam teor de sílica mais elevado.

Após a escolha dos resíduos, foram caracterizadas as amostras moldadas com diferentes teores de substituição (0%, 10%, 20% e 30%) do cimento Portland por CBCA. Note que, as amostras foram curadas sobre duas condições: saturada em hidróxido de cálcio e a cura em autoclave.

A utilização da CBCA reduziu a resistência à compressão em praticamente 15% em relação com a amostra referência. Contudo, não foram observadas alterações consideráveis na resistência à compressão entre os vários teores de CBCA utilizados, com a exceção das amostras com 30% de CBCA superior, que apresentou uma ligeira redução na resistência à compressão. Assim, o teor ótimo para utilizar a CBCA foi estipulado como 20%, cujos valores de resistência podem ser justificados pelo melhor empacotamento da mistura.

As amostras com cura saturada apresentaram maior resistência à compressão, em comparação com as curadas em autoclave. Isso pode ser explicado devido ao aumento da porosidade. Embora houve a formação de fases benéficas como a tobermorita e a xonotlita, o excesso de formação dessas fases devido ao fator água/cimento mais alto, houve aumento da porosidade e redução da resistência à compressão devido a cura em autoclave.

## 7 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALI, M. B.; SAIDUR, Rahman; HOSSAIN, M. S. A review on emission analysis in cement industries. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 15, n. 5, p. 2252-2261, 2011.

ALONSO, C; FERNANDEZ, L. Dehydration and rehydration processes of cement paste exposed to high temperature environments. **J. Mater. Sci**. v.39, pg 3015–3024, 2004.

ALTOÉ, Silvia Paula Sossai; MARTINS, Carlos Humberto. A influência da temperatura de queima na pozolanicidade da cinza do bagaço de cana-de-açúcar. **Revista de Engenharia e Tecnologia**, v. 7, n. 3, p. 40-50, 2015.

ANDRADE, T. C. C. S. de. Avaliação do tipo de cura nas propriedades de concretos de pós reativos. 102 f. **Dissertação (Mestrado**) - Curso de Programa de Pós Graduação em Engenharia de Construção Civil, Setor de Tecnologia, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2015.

ANJOS, Marcos A.S; MARTINELLI, A.E; MELO,Dulce M.A; RENOVATO, Tiago; SOUZA, Pablo D.P; FREITAS, J.C. Hydration of oil well cement containing sugarcane biomass waste as a function of curing temperature and pressure. **Journal of Petroleum Science and Engineering**, v.109, pg 291-297, 2013.

Associação Brasileira de Biogás (Abiogás) e Raízen: acessado em: https://www.canaonline.com.br/conteudo/de-onde-vem-o-que-eu-como-e-uso-residuos-da-cana-de-acucar-geram-o-biogas-que-vira-energia-eletrica-e-combustivel-substituto-do-diesel.html

**ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS**. ABNT NBR 5738: Concreto - Procedimento para moldagem e cura de corpos de prova. Rio de Janeiro, 2015.

_____. ABNT NBR 12653: Materiais pozolânicos — Requisitos. Rio de Janeiro, 2015.

_____. ABNT NBR 13276: Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos - Determinação do índice de consistência. Rio de Janeiro, 2016.

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

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

_____. ABNT NBR 7215: Cimento Portland - Determinação da resistência à compressão de corpos de prova cilíndricos. Rio de Janeiro, 2019.

_____. ABNT NBR 9778: Argamassa e concreto endurecidos - Determinação da absorção de água, índice de vazios e massa específica. Rio de Janeiro, 2005.

BASF S.A - **Ficha técnica para o aditivo MasterGlenium 51**. Disponível em:< https://doi.org/10.1590/s1983-41952021000100009>.

BASU, M.; PANDE, M.; BHADORIA, P. B. S.; MAHAPATRA, S. C. Potential fly-ash utilization in agriculture: A global review. **Progress in Natural Science.** London, v. 19, n. 10, p. 1173-1186, 2009.

BONASSA, Gabriela et al. Subprodutos gerados na produção de bioetanol: bagaço, torta de filtro, água de lavagem e palhagem. **Revista Brasileira de Energias Renováveis,** v. 4, n. 3, p. 144-166, 2015.

CHUSILP, Nuntachai; JATURAPITAKKUL, Chai; KIATTIKOMOL, Kraiwood. Utilization of bagasse ash as a pozzolanic material in concrete. **Construction and Building Materials**, v. 23, n. 11, p. 3352-3358, 2009.

CÓ JÚNIOR, C., MARQUES, M. O., TASSO JÚNIOR, L. C. Efeito residual de quatro aplicações anuais de lodo de esgoto e vinhaça na qualidade tecnológica da cana-de-açúcar. **Engenharia Agrícola**, v.28, n.1, p.196-203, 2008.

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, 2017.
CORDEIRO, G. C.; TOLEDO FILHO, R. D.; FAIRBAIRN, E. D. M. R. Ultrafine sugar cane bagasse ash: high potential pozzolanic material for tropical countries. **Revista IBRACON de estruturas e materiais**, v. 3, p. 50-67, 2010.

CORDEIRO, Guilherme Chagas; FILHO, Romildo Dias Toledo; FAIRBAIRN Eduardo de Moraes Rego; Pozzolanic activity and filler effect of sugar cane bagasse ash in Portland cement and lime mortars. **Cement and concrete composites**, v. 30, no. 5, pág 410-418, 2008.

CORDEIRO, Guilherme Chagas et al. Ultrafine grinding of sugar cane bagasse ash for application as pozzolanic admixture in concrete. **Cement and concrete research**, v. 39, n. 2, p. 110-115, 2009.

CORDEIRO, Guilherme Chagas; FILHO, Romildo Dias Toledo;FAIRBAIRN Eduardo de Moraes Rego; Caracterização de cinza do bagaço de cana-de-açúcar para emprego como pozolana em materiais cimentícios. **Química Nova**, v. 32, no. 1, pg 82-86, 2009.

CORDEIRO, Guilherme Chagas; TAVARES, L. M.; TOLEDO FILHO, R. D. Improved pozzolanic activity of sugar cane bagasse ash by selective grinding and classification. **Cement and Concrete Research**, v. 89, p. 269-275, 2016.

COSTA, Marcella Ribeiro da. Análise da reatividade pozolânica da cinza do bagaço da cana-de-açúcar. 80f. **Dissertação de mestrado**, Universidade de Londrina, Londrina, 2017.

FAIRBAIRN, Eduardo MR et al. Cement replacement by sugar cane bagasse ash: CO2 emissions reduction and potential for carbon credits. **Journal of environmental management**, v. 91, n. 9, p. 1864-1871, 2010.

FAMY, C., SCRIVENER, K. L., ATKINSON, A. E BROUGH, A. R. Effects of an early or a late heat treatment on the microstructure and composition of inner C-S-H products of Portland cement mortars. Cement and Concrete Research, v. 32, p. 269-272. 2002.

FERNANDES, Sérgio Eduardo; TASHIMA, M.M; MORAES,João C. Bassan de; ISTUQUE, Danilo Bordan; FIORITI, Cesar Fabiano; MELGES, José L. P; AKASAKI, Jorge L. Cinza de bagaço de cana-de-açúcar (CBC) como adição mineral em concretos para verificação de sua durabilidade. **Revista**, v.11661, pp. 909-923, 2015.

FERREIRA, Walkíria Pederiva. Cimento ecológico: substituição de cinza de bagaço de cana-de-açúcar derivado da indústria sucroalcooleira. 58f. **Dissertação (Mestrado)** - Engenharia Aplicada e Sustentabilidade do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia Goiano, Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia Goiano, Rio Verde-GO, 2023.

FIGUEIREDO, C. DO M.; ARAUJO, M. A.; BARBOZA, L. DA S.; SARTORTI, A. L. Análise da influência do método de aplicação da cura na resistência do concreto. **Revista Tecnológica**, v. 27, n. 1, p. 71-81, 2019.

FREITAS, E. de S. Caracterização da cinza do bagaço da cana-de-açúcar do município de Campos dos Goytacazes para uso na construção civil. **Dissertação de Mestrado** – Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro: Rio de Janeiro, 81 p, 2005.

GARCIA, Dayana Cristina Silva; Influência Da Cura Em Autoclave Na Microestrutura, Na Resistência Mecânica E Na Fotoatividade De Recobrimento De Tio2 De Materiais Cimentícios. **Tese** apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Metalúrgica, Materiais e de Minas da Escola de Engenharia, UFMG, p.1-143 Belo Horizonte, 2019.

GARCIA, Dayana Cristina Silva et al. Evaluating the effect of autoclave curing on the microstructure and compressive strength evaluation of a high strength concrete. **Matéria (Rio de Janeiro)**, v. 27, p. e13201, 2023.

GARCIA, Dayana CS; WANG, Kejin; FIGUEIREDO, Roberto B. The influences of quartz content and water-to-binder ratio on the microstructure and hardness of autoclaved Portland cement pastes. **Cement and Concrete Composites**, v. 91, p. 138-147, 2018.

GBADEYAN, Oluwatoyin Joseph et al. Waste-to-energy: the recycling and reuse of sugar industry waste for different value-added products such as bioenegy in selected countries–a critical review. **Biofuels, Bioproducts and Biorefining**, v. 18, n. 5, p. 1639-1657, 2024.

HONGWEI Tian; DIETMAR, Stephan; LOTHENBACH, Barbara; LEHMANN, Christian; Influence of foreign ions on calcium silicate hydrate under hydrothermal conditions: A review. **Construction and Building Materials**, V. 301, p.124071, 2021. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.124071.

HONGWEI Tian; DIETMAR, Stephan; LOTHENBACH, Barbara; LEHMANN, Christian; Influence of foreign ions on calcium silicate hydrate under hydrothermal conditions: A review. **Construction and Building Materials**, V. 301, p.124071, 2021. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.124071.

HOPPE FILHO, J.; GOBBI, A.; PEREIRA, E.; QUARCIONI, V.A.; MEDEIROS, M.H.F. Atividade pozolânica de adições minerais para cimento Portland (Parte I): Índice de atividade pozolânica (IAP) com cal, difração de raios-X (DRX), termogravimetria (TG/DTG) e Chapelle modificado. **Revista Matéria**, v.22, n.3, 2017.

JAGADESH P, Ramachandramurthy A, Rajasulochana P, Hasan MA, Murugesan R, Khan AH, et al., Effect of processed sugarcane bagasse ash on compressive strength of blended mortar and assessments using statistical modelling. **Case Studies in Construction Materials**. Dezembro de 2023.

KHAWAJA, S.A., JAVED, U., ZAFAR, T., et al., Eco-friendly incorporation of sugarcane bagasse ash as partial replacement of sand in foam concrete. **Cleaner Engineering and Technology**, v. 4, pp. 100164, 2021. doi: http://doi.org/10.1016/j.clet.2021.100164.

LOTHENBACH, B., SCRIVENER, K., HOOTON, R. D., “Supplementary cementitious materials”, **Cement and Concrete Research**, v. 41, n. 12, pp. 1244-1256, December 2011.

Marcela M.N.S. de Soares, Dayana C.S. Garcia, Roberto B. Figueiredo , Maria Teresa P. Aguilar, Paulo R. Cetlin. Comparing the pozzolanic behavior of sugar cane bagasse ash to amorphous and crystalline SiO2. **Cement and Concrete Composites**, v.71, pg 20-25, 2016.

MARTINS, C.H.; ZANELLA, R.M. Avaliação da absorção por capilaridade em argamassas produzidas com cinza de bagaço de cana-de-açúcar. 51º IBRACON, Curitiba-PR, 2009.

MELLER, N., HALL, C., KYRITSIS, K. E GIRIAT, G. Synthesis of cement based CaO–Al2O3–SiO2–H2O (CASH) hydroceramics at 200 and 250 °C: Ex-situ and in-situ diffraction. Cement and Concrete Research, v. 37, p. 823-833. 2007.

MODANI, P.O., VYAWAHARE, M.R., “Utilization of bagasse ash as a partial replacement of fine aggregate in concrete”, **Procedia Engineering**, v. 51, pp. 25–29, 2013. doi: http://doi.org/10.1016/j.proeng.2013.01.007.

MONTAKARNTIWONG, Kawee et al. Strength and heat evolution of concretes containing bagasse ash from thermal power plants in sugar industry. **Materials & Design**, v. 49, p. 414-420, 2013.

MORETTI, J.P., SALES, A., ALMEIDA, F.C.R., et al., Joint use of construction waste (CW) and sugarcane bagasse ash sand (SBAS) in concrete. **Construction & Building Materials**, v. 113, pp. 317–323, 2016. doi: http://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.03.062.

NOGAROTO, Leonardo Santini. Uso da energia de cogeração em usina sucroalcooleira para irrigação da cana-de-açúcar. **Repositório institucional** UNESP, 2023.

PEREIRA A, AKASAKI JL, MELGES JLP, TASHIMA MM, SORIANO L, BORRACHERO M V., et al., Mechanical and durability properties of alkali-activated mortar based on sugarcane bagasse ash and blast furnace slag. **Ceram Int** 2015;41:13012–24. https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2015.07.001.

PLÁCIDO A.C. V.; " Optimização das condições de cura de compósitos para molde destinado à reparação de defeitos em radome de aeronave", – **Dissertação de mestrado.** Universidade Nova de Lisboa. Lisboa, pp. 4- 5, 2014.

PONTES, Iago Cavalcanti; CAMPOS, Liszandra Fernanda Araújo; DUTRA, Ricardo Peixoto Suassuna. Efeitos da adição de cinza de bagaço de cana-de-açúcar nas propriedades de argamassas cimentícias. **Cerâmica Industrial**, v. 27, n. 1, p. 1-8, 2022.

RAMBABU, P. V.; ADITYA, G.; RAMARAO, G. V. Effect of acidic environment (HCL) on concrete with sugarcane bagasse ash as pozzolona. **Int. J. Eng. Res. Appl**, v. 5, n. 11, p. 59-64, 2015.

SAMPAIO, Z. L. M.; SOUZA, P. A. B. F.; GOUVEIA, B. G.. Análise da influência das cinzas do bagaço de cana-de-açúcar no comportamento mecânico de concretos. **Revista IBRACON de Estruturas e Materiais**, v. 7, n. 4, p. 626–647, ago. 2014.

SOARES, M. M. N. S. et al., The effect of calcination conditions on the physical and chemical characteristics of sugar cane bagasse ash. R**em: Revista Escola de Minas**, v. 67, p. 33-39, 2014.

SOARES, Marcela MNS et al. Comparing the pozzolanic behavior of sugar cane bagasse ash to amorphous and crystalline SiO2. **Cement and Concrete Composites**, v. 71, p. 20-25, 2016.

TAM, C.-m. e TAM, V. W.-y. Microstructural behaviour of reactive powder concrete under different heating regimes. Magazine of Concrete Research, v. 64, p. 259-267,2012.

THOMAS, Blessen Skariah et al. Sugarcane bagasse ash as supplementary cementitious material in concrete–a review. **Materials Today Sustainability**, v. 15, p. 100086, 2021.

TIAN, Weichen; LIU, Yushi; WANG, Wei. Multi-structural evolution of conductive reactive powder concrete manufactured by enhanced ohmic heating curing. Cement and Concrete Composites, v. 123, p. 104199, 2021.

TORRES, Ander de Jesus et al., Microestrutura de pastas de cimento com cinza de bagaço de cana-de-açúcar e tratamento em autoclave. ENCONTRO NACIONAL DE APROVEITAMENTO DE RESÍDUOS NA CONSTRUÇÃO, v. 8, p. 1-6, 2023.

TORRES, Ander de Jesus et al. The influence of sugarcane bagasse ash on the microstructure of autoclaved cementitious material: Comparative study with amorphous and crystalline silica. **Journal of Materials Research and Technology**, v. 33, p. 1309-1321, 2024.

XAVIER, Alfredo Augusto Pereira. Reuso de resíduos da indústria sucroalcooleira: impacto na qualidade do solo e novos métodos de caracterização utilizando LIBS. **Tese (Doutorado em Química Analítica e Inorgânica**) - Instituto de Química de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2019. doi:10.11606/T.75.2020.tde-04022020-160742.

XU, Qing et al. Characteristics and applications of sugar cane bagasse ash waste in cementitious materials. **Materials**, v. 12, n. 1, p. 39, 2018.

YADAV, A.L; SAIRAM,V; MURUGANANDAM,L; SRINIVASAN,K. An overview of the influences of mechanical and chemical processing on sugarcane bagasse ash characterisation as a supplementary cementitious material. **Journal of Cleaner Production.** V. 245, 2020.

Yazıcı, H. Deniz, B. Baradan; The effect of autoclave pressure, temperature and duration time on mechanical properties of reactive powder concrete, **Construction and Building Material**. V.42, pg 53-63, 2013.