



UNIVERSIDADE FEDERAL DE PERNAMBUCO  
CENTRO DE TECNOLOGIA E GEOCIÊNCIAS  
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL

MARIA LUIZA RAMALHO DE ARAÚJO

**MISTURAS TERNÁRIAS BASEADAS EM CAL HIDRATADA, METACALUM  
E CINZA DO BAGAÇO DE CANA-DE-AÇÚCAR COMO MATERIAIS  
CIMENTÍCIOS SUPLEMENTARES**

Recife

2022

MARIA LUIZA RAMALHO DE ARAÚJO

**MISTURAS TERNÁRIAS BASEADAS EM CAL HIDRATADA, METACALIM E  
CINZA DO BAGAÇO DE CANA-DE-AÇÚCAR COMO MATERIAIS CIMENTÍCIOS  
SUPLEMENTARES**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal de Pernambuco, como requisito parcial para obtenção de título de Mestre em Engenharia civil.

Área de concentração: Estruturas com ênfase em Construção Civil.

Orientador: Prof Dr. Antônio Acácio de Melo Neto

Recife

2022

Catálogo na fonte  
Bibliotecário Gabriel Luz CRB-4 / 2222

A663m Araújo, Maria Luiza Ramalho de.  
Misturas ternárias baseadas em cal hidratada, metacaulim e cinza do  
bagaço de cana-de-açúcar como materiais cimentícios suplementares / Maria  
Luiza Ramalho de Araújo. 2022.  
74 f: il.

Orientador: Prof. Dr. Antônio Acácio de Melo Neto Ferreira.  
Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Pernambuco. CTG.  
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Recife, 2022.  
Inclui referências e apêndices.

1. Engenharia civil. 2. Cinza do bagaço da cana de açúcar. 3. Metacaulim.  
4. Materiais cimentícios suplementares. 5. Pozolana. I. Ferreira, Acácio de  
Melo Neto (Orientador). II. Título.

UFPE

624 CDD (22. ed.)

BCTG / 2023 - 69

MARIA LUIZA RAMALHO DE ARAÚJO

MISTURAS TERNÁRIAS BASEADAS EM CAL HIDRATADA, METACAULIM E  
CINZA DO BAGAÇO DE CANA-DE-AÇÚCAR COMO MATERIAIS CIMENTÍCIOS  
SUPLEMENTARES

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal de Pernambuco, como requisito parcial para obtenção de título de Mestre em Engenharia civil. Área de concentração: Estruturas com ênfase em Construção Civil.

Aprovada em: 13/12/2022.

**BANCA EXAMINADORA**

Participação por vídeo conferência

Prof. Dr. Antônio Acácio de Melo Neto (orientador)

Universidade Federal de Pernambuco

Participação por vídeo conferência

Prof. Dr. João Paulo Castro Gomes (examinador externo)

Universidade da Beira Interior

Participação por vídeo conferência

Prof. Dr. Marcelo Henrique Farias de Medeiros (examinador externo)

Universidade Federal do Paraná

Participação por vídeo conferência

Prof. Dr. Alex Neves Junior (examinador externo)

Universidade Federal do Mato Grosso do Sul

*À Deus e a minha mãe Vânia, por sempre me propiciarem o suporte e a força para chegar até aqui.*

## **AGRADECIMENTOS**

À Deus, o autor da minha vida e história, por toda a força e suporte espiritual que precisei nesse período.

À toda a minha família, por todo o incentivo e suporte em todas as fases da minha vida, em especial minha mãe Vânia e minha irmã Ana Beatriz, por sempre me incentivarem a concluir esta etapa da minha vida.

Ao meu esposo, Josivaldo Sátiro, por toda a colaboração, incentivo e paciência, sem o seu apoio eu não conseguiria. Te amo!

Às minhas amigas Alessandra, Alana, Larissa e Ana Beatriz, por toda a torcida e alegria para as minhas conquistas. Vocês são amigas para a vida toda.

A todos os meus amigos de Campina Grande e irmãos de caminhada, por todo companheirismo ao longo da vida, tornando os dias mais leves.

Ao meu orientador, Prof. Dr. Antônio Acácio por todo o auxílio no desenvolvimento dessa pesquisa, todos os valiosos ensinamentos, paciência e colaboração.

Ao Laboratório de Tecnologia dos Aglomerantes - LABTAG, por todo o suporte ao desenvolvimento da pesquisa, assim como o amparo para o desenvolvimento de pesquisadores.

Aos professores do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal de Pernambuco pelos conteúdos valiosos que foram transmitidos nas disciplinas e me deram uma base teórica dos assuntos relacionados.

À professora Fernanda Wanderley C Araujo por toda as valiosas correções e contribuições pertinentes à dissertação.

À minha colega e amiga de laboratório, Nathália, por todo o apoio, companheirismo, em todas as disciplinas e no desenvolvimento dessa dissertação. Sua presença foi fundamental para mim!

Aos meus colegas de laboratório, em especial Victor, Priscilla, Maria Eduarda, Sofia, Camilla, por toda a ajuda e apoio nos experimentos, bem como nas discursões referentes ao tema.

Aos técnicos do laboratório, em especial a Cazuzza e Nadinho, pelo apoio no manuseio dos equipamentos, mesmo com as limitações da pandemia.

Ao Núcleo de Estudos Geoquímicos do Laboratório de Isótopos Estáveis (NEG-LABISE) da UFPE e ao Laboratório de Tecnologia Mineral – LTM – UFPE pela parceria no desenvolvimento dos ensaios de caracterização dos materiais, principalmente a Filipe Marinho, por toda a ajuda e colaboração.

À empresa Petribu pela disponibilização da Cinza do bagaço da cana-de-açúcar utilizado neste estudo, bem como a Novakem pelo fornecimento do aditivo superplastificante.

À Fundação de Amparo a Ciência e Tecnologia do Estado de Pernambuco (FACEPE), por todo o financiamento e suporte fundamentais para o desenvolvimento dessa dissertação.

Por fim, a todos que indiretamente colaboraram para a evolução e conclusão deste estudo. Meu muito obrigada!

“Não fui eu que ordenei a você? Seja forte e corajoso! Não se apavore nem desanime, pois o Senhor, o seu Deus, estará com você por onde você andar”.

Josué 1,9

## RESUMO

A utilização de materiais cimentícios suplementares (MCS), conhecidos na literatura brasileira como adições minerais, em substituição ao cimento Portland foi um avanço muito importante para o desenvolvimento de materiais cimentícios. O presente trabalho visa caracterizar as misturas ternárias de cinza do bagaço da cana-de-açúcar (CBCA) *in natura*, metacaulim (MTC) e cal hidratada, assim como a possível pozolanicidade dentre as composições de CBCA e metacaulim, para que os mesmos sejam utilizados como adição ao cimento Portland. Para isto, foram preparadas 21 composições diferentes entre os materiais de 0 a 100% de teor de CBCA *in natura* e Metacaulim, com variações de 5 em 5% entre os materiais, variando de 100% CBCA até 100% Metacaulim, para ensaios com a cal hidratada. Para ensaio com o cimento Portland, foram realizadas as análises apenas dos 10, 20, 30, 50, 60, 75 e 100% de CBCA *in natura* em composições com o MTC. Os resultados microestruturais obtidos pelos difratogramas demonstraram um consumo maior de hidróxido de cálcio a medida que a porcentagem de metacaulim aumentava e o teor de cinza de bagaço de cana-de-açúcar diminuía. Esta tendência se repetiu para os resultados dos ensaios de resistência à compressão com cal, verificando-se que uma substituição de até 55% CBCA *in natura* em misturas ternárias com o metacaulim e cal hidratada, pode ser de forma indireta considerado um material pozolânico. Acima disso, as misturas não são consideradas pozolânicas conforme o limite de 6MPa determinado pela norma. Já para o ensaio de resistência à compressão com o cimento aos 28 dias, normatizado pela NBR 5752 (ABNT, 2014), constatou-se que as composições contendo as cinzas com até 60% de CBCA *in natura* em misturas com metacaulim podem ser consideradas pozolânicas. Desta forma, há possibilidade de produzir um material pozolânico a partir de uma composição ternária com a mistura de um material de baixo potencial como a CBCA, um material de alta reatividade (metacaulim) e cal hidratada para utilização como materiais pozolânicos. Portanto, é possível solucionar o problema da CBCA que gera resíduos sem destinação em todo o Brasil e no Estado de Pernambuco.

Palavras-chave: cinza do bagaço da cana de açúcar; metacaulim; materiais cimentícios suplementares; pozolana.

## ABSTRACT

The use of supplementary cementitious materials (SCM), known in the Brazilian literature as mineral additions, to replace Portland cement was a very important advance for the development of cementitious materials. The present work aims to characterize the ternary mixtures of sugarcane bagasse ash (SCBA) in natura, metakaolin (MK) and hydrated lime, as well as the possible pozzolanicity among the compositions of SCBA and metakaolin, so that they can be used as addition to Portland cement. For this, 21 compositions were prepared in different combinations of materials of 100% content of SCBA and Metakaolin, with variations of 5 in 5% between the materials, for tests with hydrated lime. For testing with Portland cement, analyzes were performed only of 10, 20, 30, 50, 60, 75 and 100% of CBCA in natura in compositions with MTC. The microstructural results obtained by the diffractograms showed a greater consumption of calcium hydroxide as the percentage of metakaolin increased and the ash content of sugarcane bagasse decreased. This trend was repeated for the results of the compressive strength tests with lime, verifying that a substitution of up to 55% SCBA in natura in ternary mixtures with metakaolin and hydrated lime can be indirectly considered a pozzolanic material. Above that, the mixtures are not considered pozzolanic according to the limit of 6MPa determined by the standard. As for the compressive strength test with cement at 28 days, standardized by NBR 5752 (ABNT, 2014), it was found that the compositions containing ash with up to 60% of SCBA in natura in mixtures with metakaolin can be considered pozzolanic. In this way, it is possible to produce a pozzolanic material from a ternary composition by mixing a low potential material such as SCBA in natura, a high reactivity material (metakaolin) and hydrated lime for use as pozzolanic materials. Therefore, it is possible to solve the problem of SCBA that generates waste without destination throughout Brazil and in the State of Pernambuco.

Keywords: sugarcane bagasse ash; metakaolin; supplementary cementitious materials; pozzolan.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1	– Fluxograma da classificação das pozolanas .....	22
Figura 2	– Fluxograma experimental .....	31
Figura 3	– a) Amostra de CBCA e corpos moedores. b) Moinho cilíndrico de bolas .....	32
Figura 4	– Difratograma da CBCA <i>in natura</i> .....	34
Figura 5	– Distribuição granulométrica da CBCA <i>in natura</i> .....	34
Figura 6	– Difratograma do metacaulim .....	36
Figura 7	– Distribuição granulométrica do Metacaulim .....	36
Figura 8	– Difratograma do Hidróxido de Cálcio P.A. ....	38
Figura 9	– Distribuição granulométrica do Hidróxido de Cálcio P.A. ....	38
Figura 10	– Distribuição granulométrica acumulada do agregado miúdo ...	40
Figura 11	– Ensaio de massa específica. a) do metacaulim. b) da CBCA	42
Figura 12	– Aparelho de permeabilidade ao ar Blaine .....	44
Figura 13	– Granulômetro a laser Mastersizer 2000 .....	45
Figura 14	– Amostra em recipiente polimérico cilíndrico após mistura .....	47
Figura 15	– Amostras em seu período inicial de cura e nos 6 dias posteriores em estufa a 55 °C .....	48
Figura 16	– Amostras no liofilizador por um período de 24 horas .....	49
Figura 17	– Amostra moída colocada no porta-amostra para realização do ensaio de Difração de Raio X .....	49
Figura 18	– Aparelho do ensaio de difração de raio X .....	50
Figura 19	– Corpos de prova em estufa durante as 144 ± 1 h posteriores ao período de cura inicial .....	52
Figura 20	– Corpos de prova moldados para o ensaio .....	54
Figura 21	– Difratogramas de raios X das misturas ternárias com CBCA, MTC e HC .....	57
Figura 22	– Comparação entre os picos de 18° e 34° do hidróxido de cálcio com as pastas contendo CBCA <i>in natura</i> , Metacaulim e Hidróxido de Cálcio P.A com misturas de até 55% CBCA <i>in natura</i> e 45% Metacaulim .....	59
Figura 23	– Comparação entre os picos de 18° e 34° do hidróxido de cálcio com as pastas contendo CBCA <i>in natura</i> , Metacaulim e Hidróxido de Cálcio P.A com misturas de até 0% CBCA <i>in natura</i> e 100% Metacaulim .....	59
Figura 24	– Resistência à compressão das argamassas das misturas ternárias contendo CBCA, Metacaulim e hidróxido de cálcio P.A. aos 7 dias .....	60
Figura 25	– Resistência à compressão das argamassas das misturas ternárias contendo CBCA, Metacaulim e CP II F 32 aos 28 dias .....	62
Figura 26	– Correlação entre as resistências à compressão da NBR 5751 modificada e NBR 5752 .....	63

Figura 27 – Correlação entre a redução (%) do pico de hidróxido de cálcio à 18° e a resistência à compressão obtida pela NBR:5751 modificada (MPa) .....	64
Figura 28 – Correlação entre a redução (%) do pico de hidróxido de cálcio à 34° e a resistência à compressão obtida pela NBR:5751 modificada (MPa) .....	65

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Requisitos químicos e físicos .....	24
Tabela 2 – Avaliação da atividade pozolana do material .....	29
Tabela 3 – Composição química em quantidade de óxidos (%) da CBCA <i>in natura</i> .....	33
Tabela 4 – Composição química em quantidade de óxidos (%) do metacaulim .....	35
Tabela 5 – Composição química por FRX do hidróxido de cálcio. ....	37
Tabela 6 – Composição química do Cimento Portland CP II-F-32 RS .....	39
Tabela 7 – Característica física e mecânica do cimento CP II-F 32 RS .....	39
Tabela 8 – Quantidade de material, em massa (g) utilizada em cada amostra .....	46
Tabela 9 – Quantidade de material, em massa (g) utilizada em cada amostra .....	51
Tabela 10 – Quantidade de material, em massa (g) utilizada em cada amostra .....	54

# SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO</b> .....	16
1.1	CONTEXTO E JUSTIFICATIVAS .....	18
1.2	OBJETIVO .....	18
1.3	ESTRUTURA DO TRABALHO .....	19
<b>2</b>	<b>REVISÃO BIBLIOGRÁFICA</b> .....	20
2.1	MATERIAIS CIMENTÍCIOS SUPLEMENTARES .....	20
2.2	POZOLANAS .....	21
<b>2.2.1</b>	<b>Cinza do bagaço da cana-de-açúcar (CBCA)</b> .....	22
<b>2.2.2</b>	<b>Metacaulim</b> .....	24
2.3	MÉTODOS DE DETERMINAÇÃO DA POZOLANICIDADE.....	25
<b>2.3.1</b>	<b>Métodos diretos</b> .....	26
<b>2.3.2</b>	<b>Métodos indiretos</b> .....	27
<b>3</b>	<b>MATERIAIS E MÉTODOS</b> .....	30
3.1	PROGRAMA EXPERIMENTAL .....	30
3.2	MATERIAIS .....	31
<b>3.2.1</b>	<b>Cinza do bagaço da cana-de-açúcar</b> .....	31
<b>3.2.2</b>	<b>Metacaulim</b> .....	34
<b>3.2.3</b>	<b>Hidróxido de cálcio</b> .....	37
<b>3.2.4</b>	<b>Cimento Portland</b> .....	38
<b>3.2.5</b>	<b>Agregado miúdo</b> .....	40
<b>3.2.6</b>	<b>Aditivo</b> .....	40
3.3	PROCEDIMENTOS DE ENSAIOS .....	41
<b>3.3.1</b>	<b>Análises físicas</b> .....	41
<b>3.3.2</b>	<b>Análise química</b> .....	45
<b>3.3.3</b>	<b>Análise da pozolanicidade</b> .....	45
<b>4</b>	<b>RESULTADOS E DISCUSSÃO</b> .....	56
4.1	AVALIAÇÃO DA REAÇÃO POZOLÂNICA A PARTIR DO ENSAIO DE DIFRAÇÃO DE RAIOS X.....	56
4.2	ANÁLISE DOS PARÂMETROS DE POZOLANICIDADE COM CAL AOS 7 DIAS ...	60
4.3	ANÁLISE DOS PARÂMETROS DE POZOLANICIDADE COM CIMENTO PORTLAND AOS 28 DIAS.....	62
4.4	ANÁLISE DA CORRELAÇÃO ENTRE OS ÍNDICES DE ATIVIDADE POZOLÂNICA COM CAL E COM CIMENTO PORTLAND .....	63

4.5	ANÁLISE DA CORRELAÇÃO ENTRE OS ÍNDICES DE ATIVIDADE POZOLÂNICA COM CAL E A REDUÇÃO (%) DOS PRINCIPAIS PICOS (18° e 34°) DO ENSAIO DE DIFRAÇÃO DE RAIOS X.....	64
<b>5</b>	<b>CONSIDERAÇÕES FINAIS .....</b>	<b>66</b>
5.1	CONCLUSÕES.....	66
5.2	SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS .....	67
	<b>REFERÊNCIAS .....</b>	<b>68</b>
	<b>APÊNDICE A – RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO DAS ARGAMASSAS DAS MISTURAS TERNÁRIAS CONTENDO CBCA, Metacaulim e hidróxido de cálcio P.A. aos 7 dias.....</b>	<b>74</b>
	<b>APÊNDICE B – RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO DAS ARGAMASSAS DAS MISTURAS TERNÁRIAS CONTENDO CBCA, Metacaulim e cimento Portland aos 28 dias. ....</b>	<b>75</b>

## 1 INTRODUÇÃO

Os recursos naturais são amplamente utilizados como matéria-prima principalmente na construção civil, que corresponde a um dos setores produtivos que mais movimentam a economia. Como consequência dos ciclos produtivos, impactos ambientais são gerados e nesse contexto, ao longo do tempo surgiram pesquisas direcionadas na busca por materiais alternativos que minimizem esses impactos e desenvolvam novas tecnologias ao mercado (SALLABERRY, 2019).

Na construção civil, a maior parte das emissões de dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ) resultantes do consumo do concreto é atribuída ao cimento Portland, que em sua produção possui várias fontes de geração de  $\text{CO}_2$  vinculadas ao processo (FROHLICH, 2019). Calcula-se que a fonte maior de contribuição de emissões na produção do cimento Portland são as emissões devidas ao consumo energético para o aquecimento do forno de clínquerização, que chega a temperaturas de  $1450\text{ }^\circ\text{C}$ , seguida pela descarbonatação do calcário durante a sinterização da matéria-prima resultando em óxido de cálcio e a liberação do dióxido de carbono (METHA e MONTEIRO, 2014).

A utilização de materiais cimentícios suplementares (MCS), conhecidos na literatura brasileira como adições minerais, em substituição ao cimento Portland foi um avanço muito importante para o desenvolvimento de novos materiais com propriedades cimentícias (KAWASHIMA et al., 2013). Esse conceito de material cimentício suplementar é usado para minimizar as emissões de dióxido de carbono. A enorme quantidade de resíduos agrícolas como cinza do bagaço da cana-de-açúcar (CBCA), cinza da casca de arroz, entre outras, e resíduos industriais, estão sendo utilizadas atualmente como substituição parcial do cimento Portland.

A cinza do bagaço da cana-de-açúcar é um importante subproduto da produção de açúcar e álcool. No processo de extração do caldo da cana-de-açúcar a partir da moagem, uma grande quantidade de bagaço é gerada, em torno de 30% da cana moída. No Brasil, cerca de 95% desse bagaço são queimados em caldeiras para geração de vapor, produzindo, como resíduo, a cinza do bagaço da cana-de-açúcar. Esse produto, na maioria das vezes, é descartado de maneira

inadequada, sem adotar práticas propícias, podendo-se gerar sérios problemas ambientais (FERNANDES et al., 2015). Diversos estudos têm sido realizados para investigar a influência da substituição parcial do cimento por cinza do bagaço da cana-de-açúcar nas propriedades de pastas, argamassas e concretos. Este resíduo geralmente requer um tratamento mecânico ou térmico para atingir as propriedades físicas e químicas e a classificação necessária para uso como adição pozolânica no concreto, podendo produzir um aumento na resistência quando usado como MCS (CORDEIRO et al., 2011, CORDEIRO et al. 2016).

Por outro lado, Yurdakul et al. (2014) e Schlorholtz (2004) em seus estudos afirmam que a incorporação de grandes quantidades de um único tipo de material cimentício suplementar pode ter efeitos colaterais negativos. Nesses casos, uma solução possível é usar uma mistura ternária, que é uma combinação de três materiais cimentícios que são misturados para equilibrar propriedades mecânicas e durabilidade.

Dentre as adições minerais mais utilizadas em misturas binárias ou ternárias destaca-se o metacaulim. Este é considerado um material altamente reativo, além de possuir uma alta superfície específica e elevado teor de material amorfo, características que aumentam a reatividade. Sua utilização tem como benefício uma melhoria da microestrutura, que traz como consequência maiores resistências mecânicas e durabilidade. Esses benefícios têm origens em efeitos químicos e físicos (SOUSA, 2019). A adição de cal hidratada (HL) em misturas cimentícias também pode ser usado porque melhora a resistência inicial devido à reação pozolânica com a cinza volante e com sílica ativa, por exemplo (ANJOS et al., 2019).

Com isto, pretende-se inovar na produção de um material pozolânico a partir de uma composição ternária com a mistura de um material de baixo potencial pozolânico como a CBCA, um material de alta reatividade (metacaulim) e cal hidratada. Desta forma, espera-se que seja solucionado o problema da CBCA que gera resíduos sem destinação em todo o Brasil.

## 1.1 CONTEXTO E JUSTIFICATIVAS

No Estado de Pernambuco, existem resíduos de processos industriais que são característicos da região, como o bagaço de cana-de-açúcar, e que são poucos abordados por estudos para a sua aplicação na construção civil. Desta forma, esta pesquisa visa gerar conhecimento científico para contribuir para a redução do impacto ambiental causado pela geração da CBCA. Espera-se contribuições diretas, como o avanço na fronteira do conhecimento na área de fabricação de pozolana a partir da CBCA, sustentabilidade industrial e durabilidade dos compostos cimentícios produzidos com este resíduo. Este é um tema pouco estudado na região. Dessa forma, este estudo pode ajudar a reduzir o impacto ambiental gerado pela produção de etanol, possivelmente agregando valor às propriedades dos compostos cimentícios produzidos, por ser um material com potencial pozolânico. Este projeto espera ter uma grande contribuição a favor da sustentabilidade, que é o estudo da viabilidade de emprego da CBCA, um rejeito proveniente da produção do etanol, na confecção de compostos cimentícios.

## 1.2 OBJETIVO

O objetivo geral dessa dissertação é caracterizar as misturas ternárias de cinza do bagaço da cana-de-açúcar, metacaulim e cal hidratada, assim como a possível pozolanicidade dentre as composições de CBCA e metacaulim, para que os mesmos sejam utilizados como adição ao cimento Portland.

Dentre os objetivos específicos constam:

- Avaliar a reação pozolânica em pastas de hidróxido de cálcio, cinza do bagaço da cana-de-açúcar *in natura* e metacaulim, a partir do ensaio de Difração de Raios X por meio da análise da redução dos picos principais de hidróxido de cálcio e formação de Silicatos de Cálcio Hidratados (C-S-H);
- Analisar os parâmetros de pozolanicidade para as misturas ternárias através dos resultados dos ensaios de índice de atividade pozolânica (IAP) com cal (ABNT NBR 5751, 2015) e com cimento Portland (ABNT NBR 5752, 2014);

- Avaliar a correlação entre os resultados do índice de atividade pozolânica com cal e índice de atividade pozolânica com cimento Portland.
- Identificar as potenciais composições entre o CBCA e o Metacaulim para a produção de um novo material pozolânico.

### 1.3 ESTRUTURA DO TRABALHO

No primeiro capítulo são apresentados conhecimentos introdutórios ao tema bem como as justificativas e o objetivo do estudo a serem alcançados. No segundo capítulo contém a revisão bibliográfica contemplando todos os conceitos gerais sobre o tema. Inicialmente, é apresentada todas as definições sobre misturas ternárias, adições pozolânicas e os materiais utilizados nesse estudo. Também são apresentados alguns métodos diretos e indiretos para determinação da pozolanicidade dos materiais.

No terceiro capítulo contém todo o programa experimental da pesquisa, no qual são descritas e detalhadas todas as etapas do estudo. A partir do planejamento experimental, são expostos os materiais utilizados, bem como suas proporções nas misturas, juntamente com a metodologia utilizada no preparo e na execução dos ensaios.

No quarto capítulo são apresentados os resultados a respeito das misturas ternárias, indicando a partir das análises, quais composições possuem um potencial pozolânico para utilização como adições minerais. No quinto capítulo contém as conclusões obtidas a partir do estudo dos materiais e das análises realizadas em todo o desenvolvimento da dissertação, bem como propostas para estudos futuros sobre o tema estudado. Posteriormente são indicadas as referências bibliográficas utilizadas para maior entendimento sobre o tema.

## 2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

O Cimento Portland é o material de construção mais utilizado e tem enormes aplicações em áreas residenciais, comerciais e industriais. Contudo, apesar de possuir inúmeras vantagens, também contribui para as emissões globais de CO<sub>2</sub> em aproximadamente 4-8% (YADAV et al., 2020). Em 2020, no Brasil, o consumo de cimento fechou o ano com 10,6% de crescimento, totalizando 60,6 milhões de toneladas, resultando em um consumo per capita de 286 kg/hab/ano (SNIC, 2020).

A produção do clínquer consome uma quantidade considerável de matéria-prima e energia, e libera uma grande quantidade de CO<sub>2</sub> pela decomposição do carbonato de cálcio para a produção das fases minerais do clínquer. Para reduzir o impacto ambiental, foram feitas tentativas para encontrar substitutos para o cimento como a utilização dos materiais cimentícios suplementares (MCS) (ABRÃO, 2019).

### 2.1 MATERIAIS CIMENTÍCIOS SUPLEMENTARES

Uma das principais finalidades dos materiais cimentícios suplementares é a diminuição da emissão total de CO<sub>2</sub> nos concretos, a partir da diminuição do teor de clínquer nos cimentos. Visto que a descarbonatação do calcário para produzi-lo é a principal fonte de CO<sub>2</sub> na indústria do cimento. No ambiente industrial, essa característica se torna cada vez mais importante com a crescente preocupação da sustentabilidade. Visto que a indústria do cimento é responsável por aproximadamente até 8% das emissões totais de CO<sub>2</sub> no mundo, sendo cerca de 5% resultado do processo de descarbonatação e até 3% relativos aos combustíveis utilizados para aquecer os fornos (SOUSA, 2019).

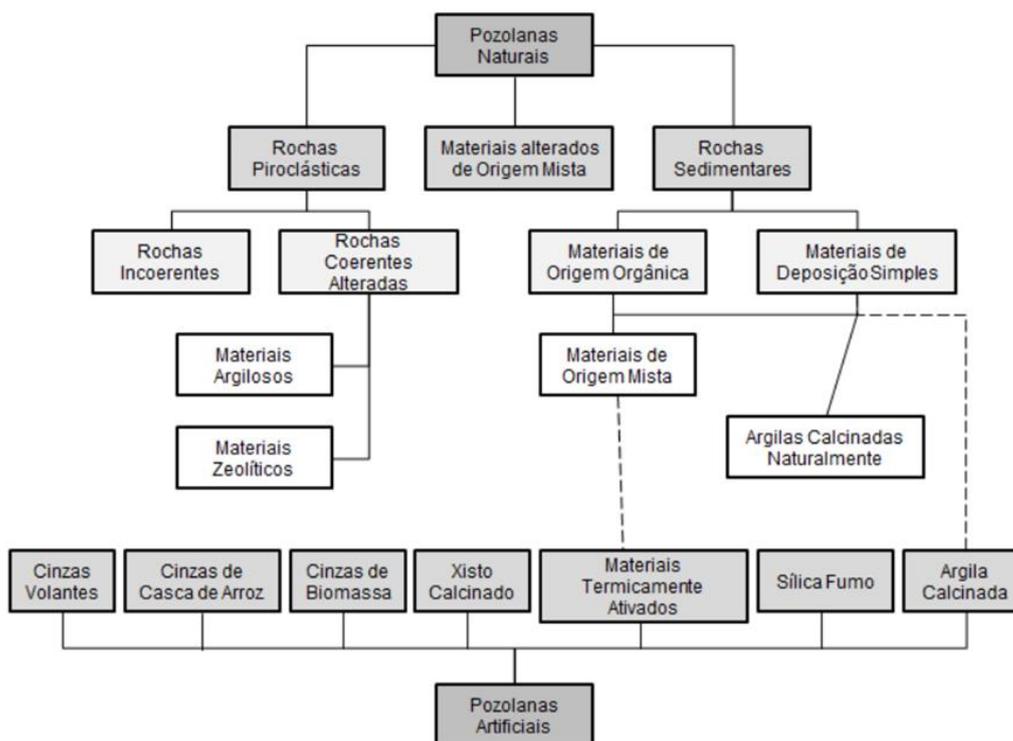
Segundo a NBR 12653 (ABNT, 2014), os materiais pozolânicos são materiais silicosos ou silicaluminosos que, por si só, possuem pouca ou nenhuma propriedade cimentante, mas, quando finamente divididos e na presença de umidade, reagem quimicamente com o hidróxido de cálcio, à temperatura ambiente para formar compostos com propriedades cimentantes. É comum avaliar a reatividade dos MCS como uma medida de analisar seu desempenho potencial em materiais cimentícios (KOLAWOLE et al., 2021).

Para melhor entendimento dos materiais suplementares, faz-se necessária a compreensão da classificação das misturas. Dessa forma, estudos variam a quantidade de elementos aplicando nas misturas dois, três e quatro componentes, sendo classificados como misturas binárias, ternárias e multicomponentes, respectivamente (NUNES, 2010). Portanto alguns efeitos na microestrutura e na durabilidade podem ser citados neste tipo de mistura. De acordo com Massana et al. (2018) outros efeitos ainda são preponderantes, bem como, efeito físico promovido pela distribuição granulométrica, gradual e contínua que é gerado por meio do uso de nano e micropartículas, demonstrando o efeito físico que as partículas das adições minerais podem apresentar. Ainda, a altíssima reatividade, pureza e amorficidade dessas adições pode promover um efeito químico muito intenso, capaz de sintetizar uma maior quantidade de silicato de cálcio hidratado (LI et al., 2017, 2018; OLTULU e ŞAHIN, 2014).

## 2.2 POZOLANAS

As pozolanas podem ser divididas em dois grandes grupos, naturais e artificiais, conforme a sua origem (Figura 1). As naturais são materiais caracterizados pelo elevado teor em sílica amorfa, sendo possível fazer a sua divisão relativa à sua origem: vulcânica, sedimentar ou mista (MASSAZZA, 1998). Por outro lado, as pozolanas artificiais dividem-se em subprodutos e resíduos industriais, que quando passam por processos químicos (aquecidos a temperaturas entre os 500°C e os 900°C) e processos físicos, podem passar a ter propriedades pozolânicas (RODRIGUES, 2004).

Figura 1 - Fluxograma da classificação das pozolanas



Fonte: Massazza (1998)

### 2.2.1 Cinza do bagaço da cana-de-açúcar (CBCA)

A cinza do bagaço da cana-de-açúcar foi pesquisada como um material cimentício suplementar em mais de cem publicações, com as primeiras pesquisas realizadas no ano de 1992 (KOLAWOLE et al., 2021). Os autores Mehrotra e Masood (1992) afirmaram que a cinza do bagaço deve ser considerada um material pozolânico como as outras pozolanas convencionais pois, as suas pesquisas revelaram que a cinza possui dois terços de sílica contida em sua composição química. Com isso, a CBCA pode ser utilizada em misturas com cal para serem utilizadas como argamassa.

A enorme quantidade de resíduos industriais ou agroindustriais como escória de metal, cinza de combustível, casca de arroz, CBCA, estão sendo obtidos a partir de energia geração, usinas de açúcar, indústrias metalúrgicas e não metálicas. Esses resíduos industriais levam a vários problemas de descarte e armazenamento (CHUSILP et al., 2009). Referente ao resíduo de CBCA, por exemplo, estimasse que o setor sucroenergético brasileiro produz anualmente 2,5 milhões de toneladas de resíduo (KHALIL et al., 2021).

Os resíduos industriais ou agroindustriais ricos em sílica e alumina são preferidos como materiais cimentícios suplementares devido à sua disponibilidade em abundância, por exigirem um processamento mínimo, e possuírem atividade pozolânica superior (YADAV et al., 2020).

Uma vez que a CBCA é composta por sílica altamente reativa, pode ser utilizada como materiais pozolânicos em concreto ao invés de descartá-lo. Geralmente, as cinzas brutas do bagaço consistem principalmente em sílica (60-75%), óxido de potássio, óxido de cálcio e outros óxidos menores (YADAV et al., 2020). A cinza do bagaço da cana-de-açúcar atua como um material pozolânico devido à sílica amorfa, sílica cristalina parcial e sílica amorfa alumina e ferrita. Esses óxidos pozolânicos são os principais óxidos que reagem quimicamente com a Portlandita [ $\text{Ca}(\text{OH})_2 - \text{CH}$ ] durante a hidratação do cimento, gerando reações pozolânicas com formação de silicato de cálcio hidrato de aluminato (KOLAWOLE et al., 2021).

De acordo com Cordeiro e Kurtis (2017), ao analisarem a pozolanicidade da CBCA sugerem que a reatividade desse resíduo, ou seja, a hidratação mais rápida na idade precoce, está associada com a finura enquanto a atividade pozolânica da CBCA, ou seja, o consumo do hidróxido de cálcio (CH) está associada à sílica amorfa.

A hidratação da CBCA como Portlandita (da hidratação do cimento) é por muitas vezes avaliada por um sistema de CBCA com cal e a microestrutura das composições analisadas por métodos analíticos como Difração de Raios X, Análise termogravimétrica (TGA), Espectroscopia no infravermelho com transformada de Fourier (FTIR) e Microscópio eletrônico de varredura (MEV) + EDS (KOLAWOLE et al., 2021). Alguns estudos investigaram a reação de hidratação da CBCA com CH e água. O principal produto relatado é o silicato de cálcio hidratado (C-S-H), que aparentam ser aglomerações amorfas densas que podem ser correlacionadas com o C-S-H da hidratação do cimento Portland mas com uma baixa relação  $\text{CaO}/\text{SiO}_2$  (FRÍAS e VILLAR-COCIÑA, 2007; SOUZA et al., 2012).

Quanto a sua análise cristalográfica, a CBCA pode conter fases cristalinas principalmente como quartzo e cristobalita. Estas fases cristalinas são

normalmente consideradas como não reativo à sua atividade pozolânica. Enquanto o cristobalita se origina da queima da CBCA, grande parte do quartzo é proveniente da contaminação devido à areia e pode ser superior a 50% (XU et al., 2018).

### 2.2.2 Metacaulim

O metacaulim é um material que permite a passagem do estado hidratado do caulim para o desidratado, através da desidroxilação da molécula da caulinita provocada pelo aquecimento (PERIM, 2013). Ainda, este é considerado um produto amorfo (não cristalino) resultante do processo de desidroxilação da caulinita, através da calcinação em temperaturas controladas (GARDOLINSKI, 2003). Quanto às dimensões do metacaulim, as partículas podem ter diâmetros próximos a 1,5 $\mu$ m (METHA e MONTEIRO, 2014) e área superficial entre 10 e 20m<sup>2</sup>/g (SOUSA, 2019).

A utilização do metacaulim para uso com cimento Portland é normatizado no Brasil pela NBR 15894 (ABNT, 2010). Na Tabela 1, podemos observar os requisitos físicos e químicos para o material em concretos, argamassas e pastas.

Tabela 1 – Requisitos químicos e físicos

Componente	Unidade	Limite	Método de ensaio
SiO <sub>2</sub>	%	≥ 44,0 e ≤ 65,0	ABNT NBR NM 22 ou ABNT NBR 14656
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	%	≥ 32,0 e ≤ 46,0	ABNT NBR NM 11-2 ou ABNT NBR 14656
CaO + MgO	%	≤ 1,5	ABNT NBR NM 11-2 ou ABNT NBR 14656
SO <sub>3</sub>	%	≤ 1,0	ABNT NBR NM 16
Na <sub>2</sub> O	%	≤ 0,5	ABNT NBR NM 17
Equivalente alcalino em Na <sub>2</sub> O	%	≤ 1,5	ABNT NBR NM 17
Umidade	%	≤ 2,0	ABNT NBR NM 24
Perda ao fogo	%	≤ 4,0	ABNT NBR NM 18
Resíduo na peneira com abertura de malha de 45 $\mu$ m	%	≤ 10,0	ABNT NBR 15894-3
Índice de desempenho com cimento aos 7 dias	%	≥ 105	ABNT NBR 15894-2
Índice de atividade pozolânica Chapelle (opcional)	$mg_{Ca(OH)_2}/g_{material}$	≥ 705	ABNT NBR 15895
Área específica B.E.T. (opcional)	m <sup>2</sup> .g <sup>-1</sup>	≥ 15	ASTM C-1069

Fonte: Adaptado ABNT NBR 15894 (2010)

Segundo Haheem et al., (2021), o metacaulim difere principalmente da maioria dos outros materiais pozolânicos devidos à sua alta reatividade com a cal e sua capacidade de acelerar a hidratação. A sílica e a alumina contidas na pozolana têm a tendência de reagir com a cal produzida durante a hidratação do cimento na presença de água, formando produtos cimentícios. Astutiningsih et al., (2018) acrescenta que o metacaulim quando usado como substituto parcial do cimento portland, reage com o hidróxido de cálcio ( $\text{Ca(OH)}_2$ ) resultando em Silicato de cálcio hidratado (C-S-H), bem como produzindo fases adicionais contendo alumina, algumas sendo cristalinas. Estas incluem  $\text{C}_4\text{AH}_{13}$ ,  $\text{C}_3\text{AH}_6$ ,  $\text{C}_2\text{ASH}_8$ .

O metacaulim atua na cinética da hidratação do cimento de duas formas distintas. A primeira é como efeito fíler, que abrange mecanismos físicos de aumento de velocidade de reação. A outra forma de atuação é como um efeito químico resultante diretamente das reações químicas da adição, compreendendo a reação pozolânica (SOUSA, 2019). Os estudos de Shehab El-din et al., (2017) verificaram o desempenho mecânico de concretos com teores de metacaulim entre 0 e 50%. Foi observado que 15% de metacaulim apresentou os maiores valores de resistência. Kalpokaite-Dickuviene et al., 2019 em seus estudos indicaram que o desenvolvimento da resistência à compressão das cinzas de incineração em composições binárias é lento. Todavia, quando usado com Metacaulim, as composições tendem a exibir resistências mecânicas semelhantes à pasta de referência.

### 2.3 MÉTODOS DE DETERMINAÇÃO DA POZOLANICIDADE

Os métodos para a avaliação da pozolanicidade podem ser definidos como diretos, quando avaliam a variação do teor de  $\text{Ca(OH)}_2$  pelo tempo, ou indiretos, à medida que medem as propriedades físicas e mecânicas dos compostos com materiais pozolânicos (FERREIRA, 2015). Dentre os métodos diretos, pode-se citar o método de Chapelle modificado, Método de Frattini, Difração de raio X e Análise termogravimétrica (ATG) como exemplos de ensaios para a determinação da atividade pozolânica. Já os ensaios de Índice de Atividade Pozolânica (IAP), calorimetria e condutividade elétrica, são exemplos de métodos indiretos para se medir/verificar a pozolanicidade do material.

### 2.3.1 Métodos diretos

Dentre os métodos diretos para determinação do índice de atividade pozolânica dos materiais, tem-se o método Chappelle modificado. Este método permite observar a capacidade do material pozolânico em fixar o hidróxido de cálcio pela ação pozolânica, para a formação de compostos hidratados (HOPPE FILHO et al., 2017). A NBR 15895 (ABNT, 2010), nomeada “Determinação do teor de hidróxido de cálcio fixado – Método Chappelle modificado”, especifica um procedimento por meio da determinação do teor de hidróxido de cálcio fixado pela pozolana por meio de soluções de hidróxido de cálcio. No procedimento, ensaia-se uma solução apenas com hidróxido de cálcio e outra solução com proporção de 1g de pozolana para 1g de  $\text{Ca(OH)}_2$ , a uma agitação durante  $16 \pm 1$  h e a uma temperatura de  $90 \pm 5$  °C. Raverdy et. al., (1980) estabelece que o valor mínimo para classificação da adição mineral como material pozolânico é de valores de consumo de cal superiores a 330mg CaO/g de adição (equivalente a 436 mg  $\text{Ca(OH)}_2$ /g de adição).

Ao analisar amostras de metacaulim, Medina (2011) avaliou a capacidade de fixação de cal do material com diâmetro médio das partículas de 9,05  $\mu\text{m}$  e obteve o consumo de 999,24 mg  $\text{Ca(OH)}_2$  / g de metacaulim, comprovando-se que se trata de um material com elevada atividade pozolânica. Hoppe Filho et al., (2017) afirma que a capacidade de fixar cal não depende apenas das características físicas das partículas, mas também da composição química e a constituição da fração amorfa, características relevantes para a definição da atividade pozolânica do material.

Outro método para determinação do índice de pozolanicidade é o por meio de titulação química, o método de Fratini, regulamentado no Brasil pela norma NBR 5753 (ABNT, 2016). O teste de Fratini avalia a pozolanicidade de cimentos pozolânicos, por meio da comparação das concentrações dissolvidas dos íons cálcio presentes em uma solução aquosa, após um período fixado, e a quantidade de íons cálcio capaz de saturar uma solução de mesma alcalinidade. Assim, o resultado é positivo quando a concentração de íons cálcio na solução for menor do que a concentração saturada. Esse método pode determinar as concentrações dissolvidas dos íons  $\text{Ca}^{2+}$  e hidróxidos  $\text{OH}^-$  em uma solução aquosa contendo cimento e a pozolana teste (BASTO, 2018; FROHLICH, 2019).

Esta técnica é largamente utilizada na literatura para estudos com diferentes tipos de adições pozolânicas (FROLICH, 2019; IRASSAR et al., 2014; TIRONI et al., 2013), bem como também para análises de composições e comparação de testes (DONATELLO et al., 2010; FERNANDES, 2018).

O ensaio de difração de Raio X é uma técnica que permite a avaliação da estrutura cristalina do material, a partir do padrão de picos com intensidades variáveis em determinados ângulos característicos. A verificação da reatividade da pozolana é realizada a partir da análise das fases amorfa e cristalina da sílica presente no material, uma vez que os materiais que possuem uma maior quantidade de sílica amorfa possuem uma maior reatividade (SNELLINGS, 2016; QUARCIONI et al., 2015). Com relação às possíveis análises obtidas por esse ensaio, Snellings et al. (2016) afirmam que a técnica é utilizada para identificar as fases cristalinas dos materiais anidros, como a portlandita (hidróxido de cálcio), calcita ( $\text{CaCO}_3$ ), etringita (sulfoaluminato de cálcio hidratado) e quartzo, como também as fases do cimento hidratado. Porém, com relação as fases das misturas hidratadas, muitas vezes ocorre a sobreposição de picos e é difícil a identificação entre os compostos formados.

A análise termogravimétrica (ATG) consiste em um método que possui um elevado potencial para analisar a atividade pozolânica, visto que é útil para estimar a quantidade de hidróxido de cálcio ( $\text{Ca(OH)}_2$ ) em materiais à base de cimento Portland (SOARES, 2017). No ensaio de termogravimetria, a amostra é submetida a uma temperatura controlada, ao mesmo tempo que se mede a variação da massa em função da temperatura. A medida em que a concentração de  $\text{Ca(OH)}_2$  diminui, aumenta-se a quantidade de silicato de cálcio hidratado (C-S-H) e de aluminato de cálcio hidratado (C-A-H) (TIRONI et al. 2014).

### **2.3.2 Métodos indiretos**

Os métodos indiretos para determinação da pozolanicidade de um material são fundamentados em função de uma das propriedades resultantes do composto analisado (MARTINS, 2018). A caracterização das adições minerais do tipo pozolana está baseada, na prática, em métodos indiretos de quantificação do potencial reativo por meio do índice de atividade pozolânica (IAP) com cal hidratada aos 7 dias ou com o cimento Portland aos 28 dias, conforme

preconizam as normas NBR 5751 (ABNT, 2015) e NBR 5752 (ABNT, 2014) (HOPPE FILHO, 2017).

O critério mais comum de avaliar a pozolanicidade de forma indireta é por meio da resistência à compressão de argamassas compostas com misturas do aglomerante e de pozolanas (BASTO, 2018). A metodologia de ensaio normatizada pela NBR 5751 (ABNT, 2015) preconiza um procedimento de avaliação da resistência aos 7 dias de argamassas compostas com cal hidratada e a pozolana que se deseja avaliar. Neste procedimento são confeccionados 3 corpos de prova cilíndricos de 5x10 cm com um quantitativo composto por cal hidratada, pozolana, areia e água deionizada para atingir uma consistência de  $225 \pm 5$  mm. A norma 12653 (ABNT, 2014) afirma que para o material ser considerado uma pozolana, os resultados dos ensaios de resistência à compressão devem apresentar um valor maior ou igual a 6 Mpa.

O índice da atividade pozolânica também pode ser obtido de forma indireta através do ensaio proposto pela NBR 5752 (ABNT, 2014), no qual são analisados os resultados da resistência à compressão aos 28 dias, de argamassas compostas com misturas da pozolana com cimento Portland. A norma preconiza que o Índice de desempenho da pozolana ( $I_{\text{cimento}}$ ) seja calculado a partir da razão entre a resistência média ( $f_{cB}$ ) de quatro a seis corpos de prova cilíndricos de dimensões 5x10 cm, moldados a partir de um quantitativo que determina que para a argamassa B possua 25% de material pozolânico em substituição ao cimento Portland, e a resistência média ( $f_{cA}$ ) de uma mesma quantidade de corpos-de-prova com argamassas de referência, como pode-se observar na equação X. O quantitativo possui proporções e quantidades já fixadas em norma e o índice de consistência determinado para a argamassa B é de  $\pm 10$  mm do obtido pela argamassa de referência (A). Como resultado do ensaio, para que o material seja considerado pozolânico, o índice de desempenho da argamassa B deve ser maior que 90% do resultado obtido para a argamassa de referência.

A considerar o consumo do hidróxido de cálcio como um indicativo da atividade pozolânica, Luxán et al. (1989) propôs uma metodologia de análise a partir da condutividade elétrica de uma solução saturada de hidróxido de cálcio a uma temperatura de 40°C. A partir do experimento, verificou-se que a condutividade

elétrica diminuiu durante os primeiros 120 minutos e depois estabilizou. A partir dessa metodologia, diversos autores pesquisaram adaptações para esse ensaio ao analisarem o tempo que a condutividade continua a diminuir propondo até 85.000s (SILVA, 2016; VILLAR COCIÑA 2005). Luxán et al. (1989) nos seus estudos, propôs valores para classificação do material analisado com base na variação da condutividade, como pode ser observado na Tabela 2. O resultado do ensaio pode ser obtido ao calcular a diferença da condutividade nos tempos inicial e final, comparando com os parâmetros propostos (TAVARES, 2019).

Tabela 2 - Avaliação da atividade polozana do material

<b>Varição da condutividade (mS/cm)</b>	<b>Classificação do material</b>
Menor que 0,40	Não pozolana
Entre 0,40 e 1,20	Pozolana variável
Maior que 1,20	Boa pozolana

Fonte: Adaptado de Luxán et al. (1989)

Outro método indireto de estudar a pozolanicidade dos materiais em misturas com cimento Portland, é o ensaio de calorimetria isotérmica. Relativamente as reações de hidratação do cimento, a aplicação desta técnica tem como objetivo avaliar a cinética e duração dessas interações (SCRIVENER et al., 2016). Os resultados podem ser obtidos através de duas curvas, a primeira relacionando tempo e taxa de calor em mW por grama de ligante e a segunda relacionando o tempo e o calor acumulado em Joule por grama (ABRÃO, 2019).

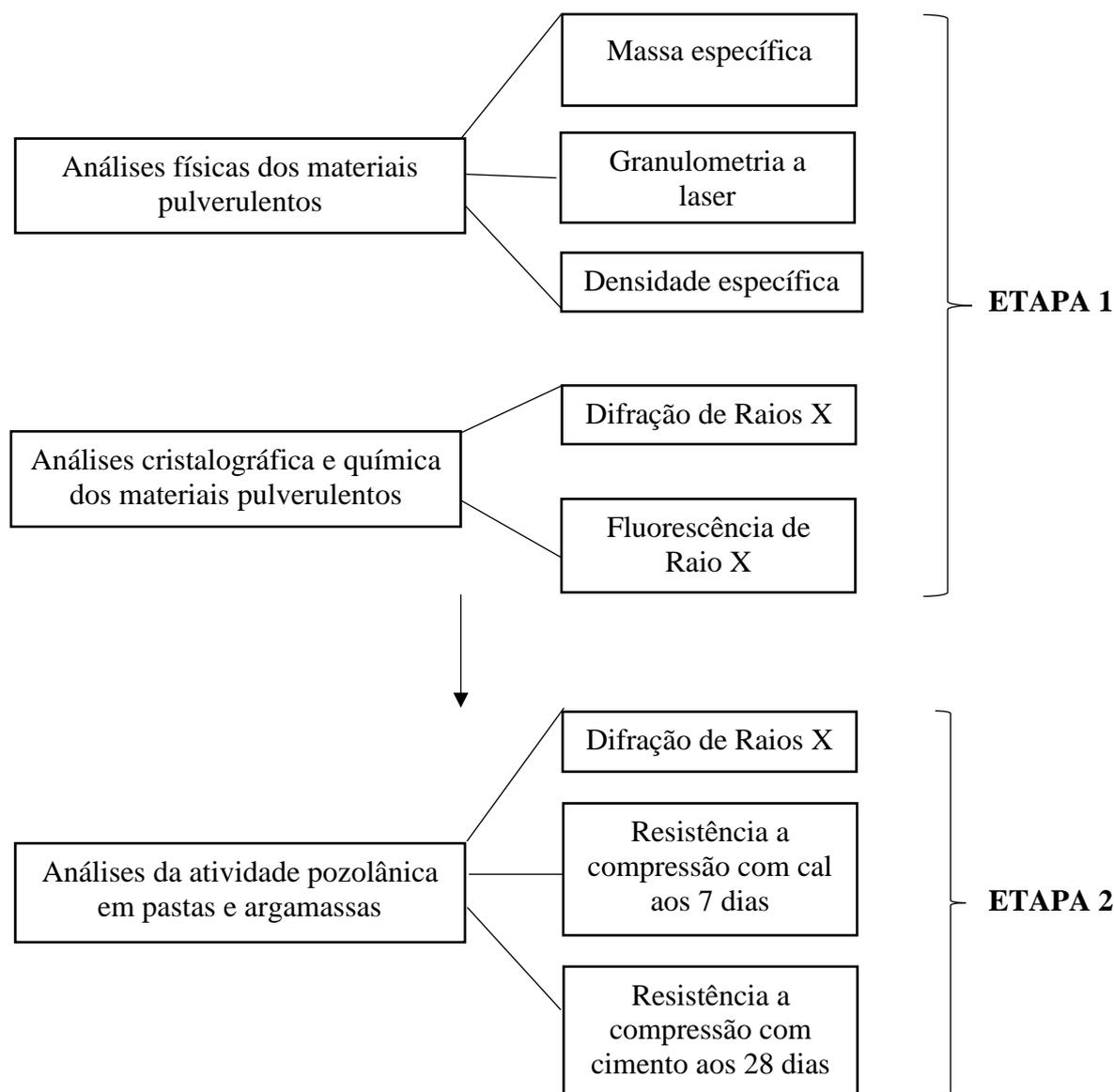
### **3 MATERIAIS E MÉTODOS**

Neste capítulo são apresentados os materiais e métodos utilizados durante todo período experimental dessa pesquisa. O intuito do programa experimental é descrever a metodologia utilizada em cada etapa de pesquisa, indicando as proporções de composições estudadas, a descrição de todos os procedimentos para preparação e ensaio das amostras, bem como a caracterização dos materiais empregados. Os ensaios foram realizados no Laboratório de Tecnologia dos Aglomerantes - UFPE, com exceção do ensaio de Fluorescência de Raios X executado no Núcleo de Estudos Geoquímicos - Laboratório de Isótopos Estáveis – UFPE e o ensaio de Granulometria a Laser realizado no Laboratório de Tecnologia Mineral - UFPE.

#### **3.1 PROGRAMA EXPERIMENTAL**

Na primeira etapa do programa experimental, as análises físicas dos materiais pulverulentos foram realizadas a partir dos ensaios de massa específica pelo frasco Le Chatelier (ABNT NBR 11513, 2016), superfície específica pelo Método Blaine (ABNT NBR 16372, 2015) e a granulometria a laser. A caracterização física do agregado miúdo foi feita a partir do ensaio de granulometria e do ensaio de densidade específica. As análises químicas foram executadas a partir do ensaio de fluorescência de raio X e a análise cristalográfica por meio do ensaio de difração de raio X. Posterior aos ensaios de caracterização e análise química, em uma segunda etapa do estudo, foram elaborados os ensaios para determinação da pozolanicidade do novo material desenvolvido na pesquisa a partir dos ensaios de difração de raio X, atividade pozolânica com cal aos 7 dias e determinação da atividade pozolânica com cimento aos 28 dias. Na Figura 2, se apresenta uma síntese descritiva das etapas experimentais para a caracterização dos materiais e análise da atividade pozolânica das misturas.

Figura 2 – Fluxograma experimental.



Fonte: Autora (2022).

## 3.2 MATERIAIS

### 3.2.1 Cinza do bagaço da cana-de-açúcar

A cinza utilizada foi proveniente do bagaço da cana-de-açúcar produzida pela Usina Petribu, localizada na Zona Rural do município de Lagoa de Itaenga em Pernambuco. No processo de moagem, a cinza do bagaço da cana-de-açúcar é o resíduo final na cadeia produtiva do açúcar, gerada a partir da queima do bagaço sem temperatura controlada. A cinza resultante do processo foi coletada de forma única após a abertura inferior da caldeira, sem passar por processos subsequentes de lavagem ou armazenamento nos tanques de decantação. A cinza coletada apresenta cor escura e granulometria grosseira, indicando que a

queima na usina ocorreu em temperaturas inadequadas e possivelmente possui um elevado teor de carbono (Figura 3).

Para obter uma granulometria mais uniforme, a cinza utilizada na pesquisa foi moída por meio de uma moagem mecânica por um tempo de 10 minutos, suficiente para a cominuição das partículas maiores. Foi utilizado um moinho cilíndrico de bolas com dimensões de 30 cm x 26 cm e volume de 15,9 litros. As esferas presentes no interior do moinho são compostas de porcelana e possuem três diâmetros diferentes de 35 mm, 20 mm e 13 mm, totalizando 8 kg. Durante o processo, foi inserido 1 kg de cinza por moagem em uma velocidade do moinho de 50 rpm.

Figura 3 – a) Amostra de CBCA e corpos moedores. b) Moinho cilíndrico de bolas.



Fonte: A autora (2022)

Após a cominuição e padronização das partículas, foram coletadas amostras da cinza do bagaço da cana-de-açúcar *in natura* para realização dos ensaios de caracterização do material. Com relação a caracterização física, a massa específica obtida a partir do frasco de *Le Chatelier* apresentou um resultado de  $2,11 \text{ g/cm}^3$  e a superfície específica pelo método Blaine de  $181,56 \pm 50 \text{ m}^2/\text{kg}$ .

A respeito da análise química, os resultados obtidos pelo ensaio de Fluorescência de Raios-X mostram que a cinza *in natura* é constituída majoritariamente por óxido de silício (53,11%), posteriormente por óxido de cálcio (CaO), óxido de alumínio ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ), óxido de ferro ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ) e, em menor quantidade, por outros óxidos. A perda ao fogo elevada evidencia a queima não controlada. A Tabela 3 apresenta a composição química da CBCA *in natura*.

Tabela 3 – Composição química em quantidade de óxidos (%) da CBCA *in natura*.

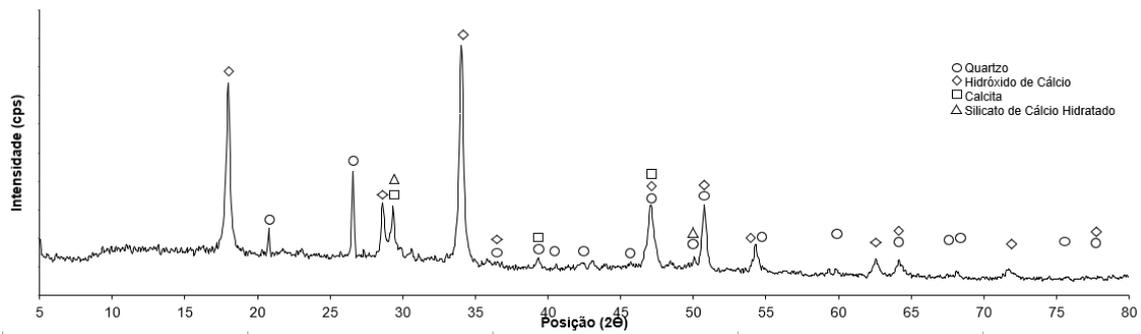
<b>Óxidos</b>	<b>Teor em massa (%)</b>
<b>SiO<sub>2</sub></b>	59,48
<b>K<sub>2</sub>O</b>	3,45
<b>Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub></b>	3,42
<b>Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub></b>	3,09
<b>CaO</b>	2,50
<b>P<sub>2</sub>O<sub>5</sub></b>	1,35
<b>MgO</b>	1,18
<b>Na<sub>2</sub>O</b>	0,70
<b>SO<sub>3</sub></b>	0,43
<b>Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub></b>	0,43
<b>TiO<sub>2</sub></b>	0,35
<b>NiO</b>	0,14
<b>MnO</b>	0,13
<b>ZrO<sub>2</sub></b>	0,06
<b>BaO</b>	0,06
<b>SrO</b>	0,03
<b>CuO</b>	0,01
<b>ZnO</b>	0,01
<b>Rb<sub>2</sub>O</b>	0,01
<b>P.F</b>	23,19
<b>Total</b>	100,00

\*PF = perda ao fogo

Fonte: Autora (2022)

A Figura 4 apresenta o difratograma da CBCA *in natura*. Pode-se perceber uma grande quantidade de picos de quartzo (SiO<sub>2</sub>), corroborando com o resultado da análise química realizada pela Fluorescência de Raios-X. A sílica cristalina é geralmente considerada um composto inerte (CORDEIRO et al., 2016). A Sílica cristalina geralmente vem de duas fontes: o processo de incineração descontrolado e a areia que oriunda do processo de colheita. Embora a quantidade de areia que adere à cana-de-açúcar seja pequena (aproximadamente 2%), após a incineração da caldeira a proporção da massa da areia para o CBCA como impureza aumenta significativamente para mais de 50% (XU et al., 2018).

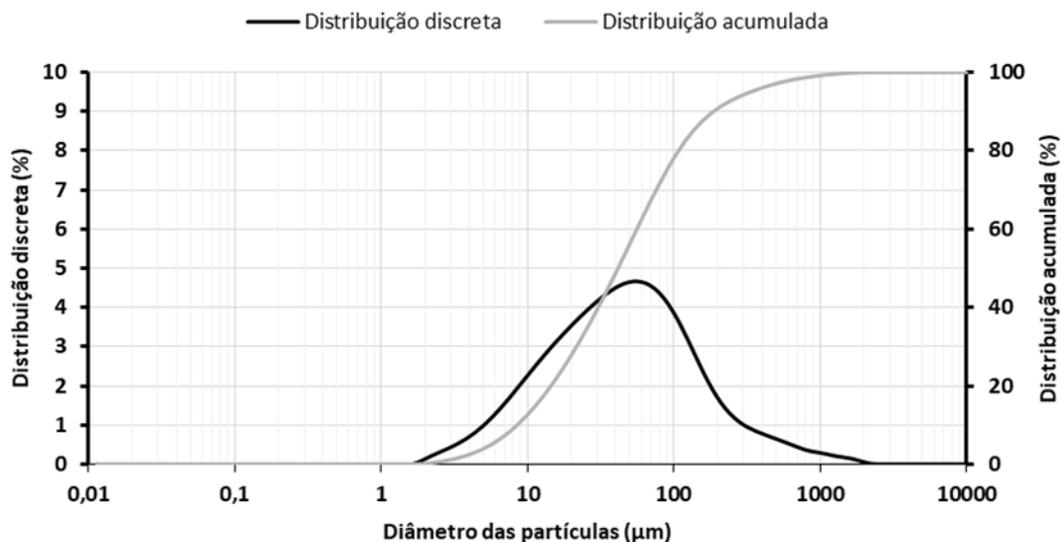
Figura 4 – Difratoograma da CBCA *in natura*.



Fonte: A autora (2022)

A curva da distribuição granulométrica da CBCA *in natura* encontra-se na Figura 5. O diâmetro médio de volume  $D_{4,3}$  é 190,85  $\mu\text{m}$  e tamanho médio das partículas  $D_{50}$  é de 79,18  $\mu\text{m}$  para a amostra de cinza no estado natural.

Figura 5 – Distribuição granulométrica da CBCA *in natura*.



Fonte: A autora (2022)

### 3.2.2 Metacaulim

O Metacaulim é considerado uma pozolana de alto desempenho, altamente reativa e finamente moída, oriunda da calcinação da argila caulínica. O metacaulim HP ULTRA utilizado nesta pesquisa foi produzido pela empresa Metacaulim do Brasil. Possui coloração creme claro, massa específica de 2,57  $\text{g}/\text{cm}^3$  e superfície específica no valor de 839,67  $\text{m}^2/\text{kg}$ , determinada conforme NBR 16372 (ABNT, 2015). A partir da composição química analisada, obtida a

partir do ensaio de Fluorescência de Raios X, nota-se que é composto em sua maior parte por dióxido de silício (59,3%) e óxido de alumínio, possuindo um somatório de  $\text{SiO}_2$  e  $\text{Al}_2\text{O}_3$  de 92,67%. A composição química do metacaulim é apresentada na Tabela 4.

Tabela 4 – Composição química em quantidade de óxidos (%) do metacaulim.

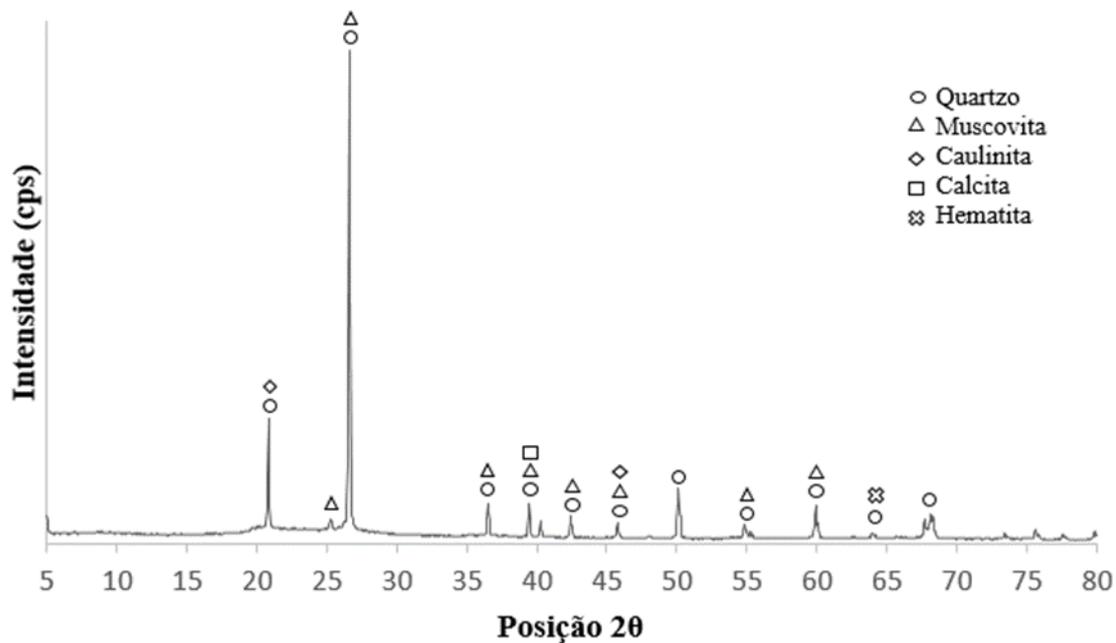
<b>Óxidos</b>	<b>Teor em massa (%)</b>
<b><math>\text{SiO}_2</math></b>	59,3
<b><math>\text{Al}_2\text{O}_3</math></b>	33,37
<b><math>\text{Fe}_2\text{O}_3</math></b>	1,45
<b><math>\text{CaO}</math></b>	0,08
<b><math>\text{P}_2\text{O}_5</math></b>	0,04
<b><math>\text{MgO}</math></b>	0,21
<b><math>\text{K}_2\text{O}</math></b>	0,27
<b><math>\text{Na}_2\text{O}</math></b>	-
<b><math>\text{CuO}</math></b>	-
<b><math>\text{MnO}</math></b>	0,01
<b><math>\text{SO}_3</math></b>	0,05
<b><math>\text{NiO}</math></b>	-
<b><math>\text{TiO}_2</math></b>	1,5
<b>PF*</b>	3,87

\*PF = perda ao fogo

Fonte: Autora (2022)

A Figura 6 apresenta o difratograma do metacaulim utilizado, obtido a partir do ensaio de difração de raio X. Com o referido difratograma, é possível analisar a composição mineralógica do material e observar que o metacaulim apresenta como picos principais o quartzo ( $\text{SiO}_2$ ), a caulinita ( $\text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_5(\text{OH})_4$ ), a muscovita ( $\text{KAl}_3\text{Si}_3\text{O}_{10}(\text{OH})_2$ ) e a calcita ( $\text{CaCO}_3$ ). Todos os picos principais encontrados corroboram com os óxidos observados na composição química. Os picos com intensidade menor do feixe refletido em função do ângulo de reflexão, bem como o halo amorfo (Entre os ângulos  $15^\circ$  e  $25^\circ$ ), são indicativos de que o material possui características amorfas.

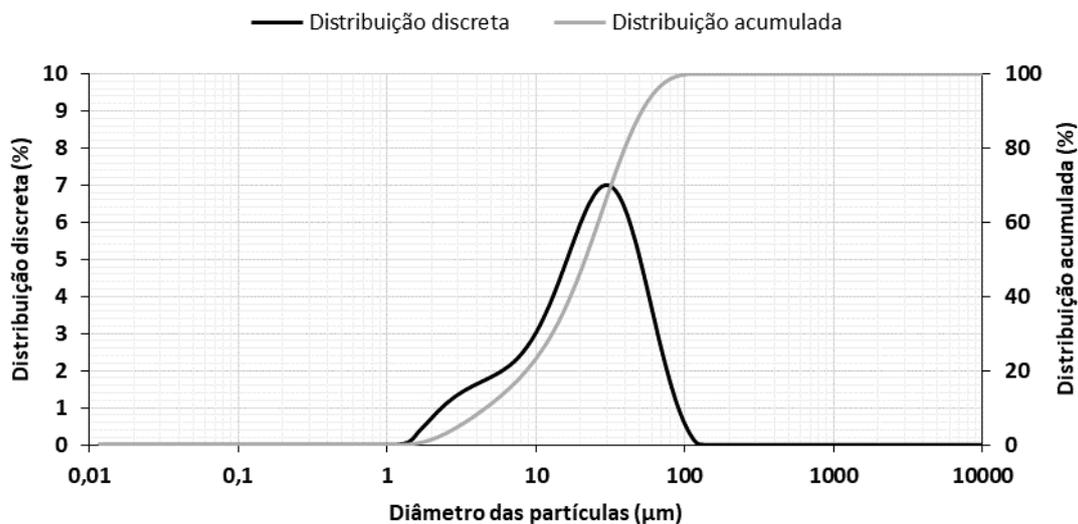
Figura 6 – Difratoograma do metacaulim.



Fonte: A autora (2022)

A curva da distribuição granulométrica do metacaulim obtida pela granulometria a laser encontra-se na Figura 7. O valor do diâmetro superficial médio das partículas foi de 11,42  $\mu\text{m}$  e o tamanho médio das partículas  $D_{50}$  é de 21,43  $\mu\text{m}$ .

Figura 7 – Distribuição granulométrica do Metacaulim.



Fonte: A autora (2022)

### 3.2.3 Hidróxido de cálcio

Nesta pesquisa utilizou-se o hidróxido de cálcio P.A. por se tratar de um material com elevado grau de pureza (teor mínimo de 95%) a fim de garantir maior segurança na obtenção dos resultados. Este material foi fornecido pela empresa ISOFAR e foi utilizado para a realização dos ensaios de determinação da atividade pozolânica com cal hidratada e difração de raios X. Na Tabela 5, pode-se observar a composição química do material utilizado obtido através do ensaio de fluorescência de raios x (FRX). Percebe-se que o material é composto predominantemente por óxido de cálcio (CaO).

Tabela 5 – Composição química por FRX do hidróxido de cálcio

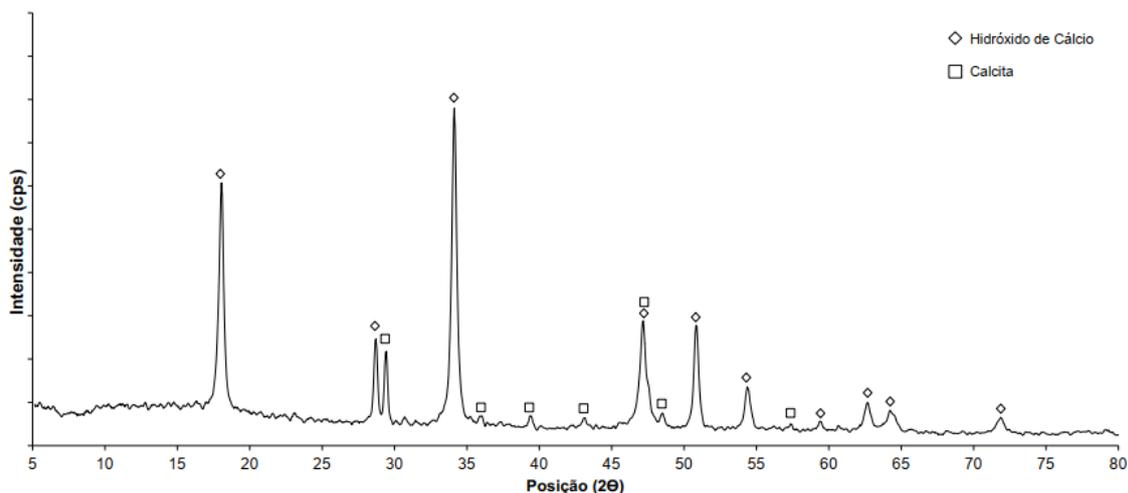
<b>Óxidos</b>	<b>Teor em massa (%)</b>
<b>SiO<sub>2</sub></b>	0,26
<b>Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub></b>	0,1
<b>Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub></b>	0,08
<b>CaO</b>	72,98
<b>P<sub>2</sub>O<sub>5</sub></b>	0,07
<b>MgO</b>	0,96
<b>K<sub>2</sub>O</b>	0,24
<b>SO<sub>3</sub></b>	0,04
<b>SrO</b>	0,15
<b>PF</b>	25,13

\*PF = perda ao fogo

Fonte: Autora (2022)

A respeito das propriedades físicas, foram obtidas a massa específica de 2,24 g/cm<sup>3</sup>. Analisou-se as características mineralógicas do Hidróxido de cálcio por meio do Ensaio de direção de raios x, resultados apresentados na Figura 8, observando-se que o material é formado preponderantemente por hidróxido de cálcio e alguns picos de calcita (CaCO<sub>3</sub>), comprovando o alto teor de Ca(OH)<sub>2</sub> que propicia a reação com as pozolanas.

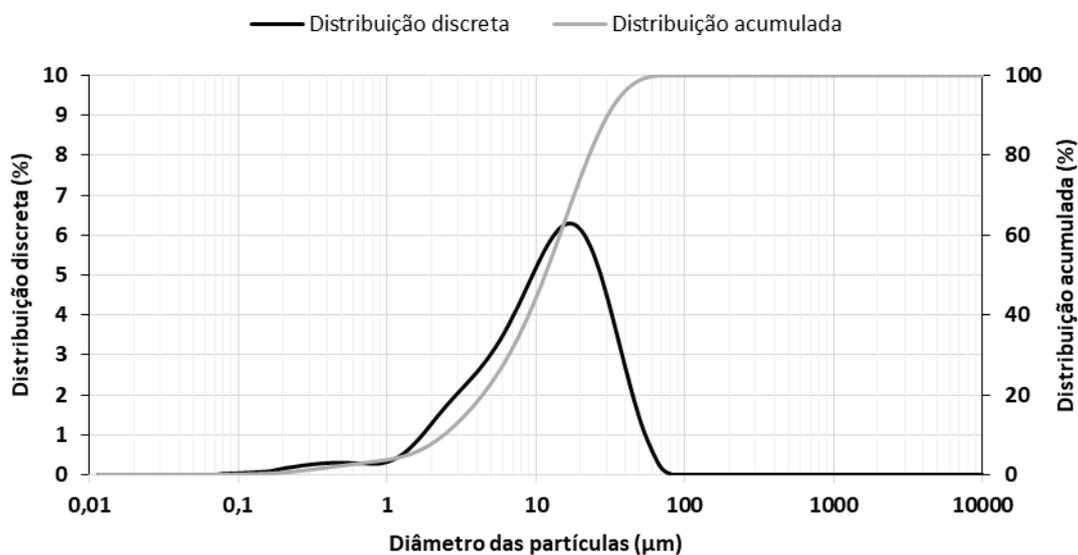
Figura 8 – Difratoograma do Hidróxido de Cálcio P.A.



Fonte: A autora (2022)

A Figura 9 demonstra a distribuição granulométrica discreta e contínua das partículas do hidróxido de cálcio obtidos a partir do ensaio de granulometria a laser. O diâmetro superficial médio das partículas foi de 3,99  $\mu\text{m}$ .

Figura 9 – Distribuição granulométrica do Hidróxido de Cálcio P.A.



Fonte: A autora (2022)

### 3.2.4 Cimento Portland

O cimento utilizado para o desenvolvimento desta pesquisa foi o cimento Portland composto com material carbonático e resistente a sulfatos CP II F 32 RS, fabricado pela Cimento Nacional. As características físicas, químicas e

mecânicas do cimento estão de acordo com a NBR 16697 (ABNT, 2018), apresentadas na Tabela 6 e 7. Este cimento foi utilizado para o desenvolvimento do ensaio de determinação do índice de desempenho com cimento Portland aos 28 dias para materiais pozolânicos normatizado pela NBR 5752 (ABNT, 2014).

Tabela 6 - Ensaio químicos no Cimento Portland CP II-F-32 RS

Ensaio	Metodologia	Desv.Pad.	Resultado	Exigências
Óxido de Magnésio - MgO	ABNT NBR 14656	0,08	2,75	Não aplicável
Trióxido de Enxofre - SO <sub>3</sub>	ABNT NBR 14656	0,11	2,70	≤ 4,5
Óxido de Sódio - Na <sub>2</sub> O	ABNT NBR 14656	0,01	0,05	Não aplicável
Óxido de Potássio - K <sub>2</sub> O	ABNT NBR 14656	0,04	1,19	Não aplicável
Equivalente Alcalino - Na <sub>2</sub> O <sub>eq</sub>	Na <sub>2</sub> O + 0,658*K <sub>2</sub> O	0,03	0,83	Não aplicável
Resíduo Insolúvel - RI	ABNT NBR NM 15	0,73	5,62	≤ 7,5
Perda ao Fogo - PF	ABNT NBR NM 18	0,67	10,33	≤ 12,5

Fonte: Cimento Nacional (2021)

Tabela 7 - Característica física e mecânica do cimento CP II-F 32 RS

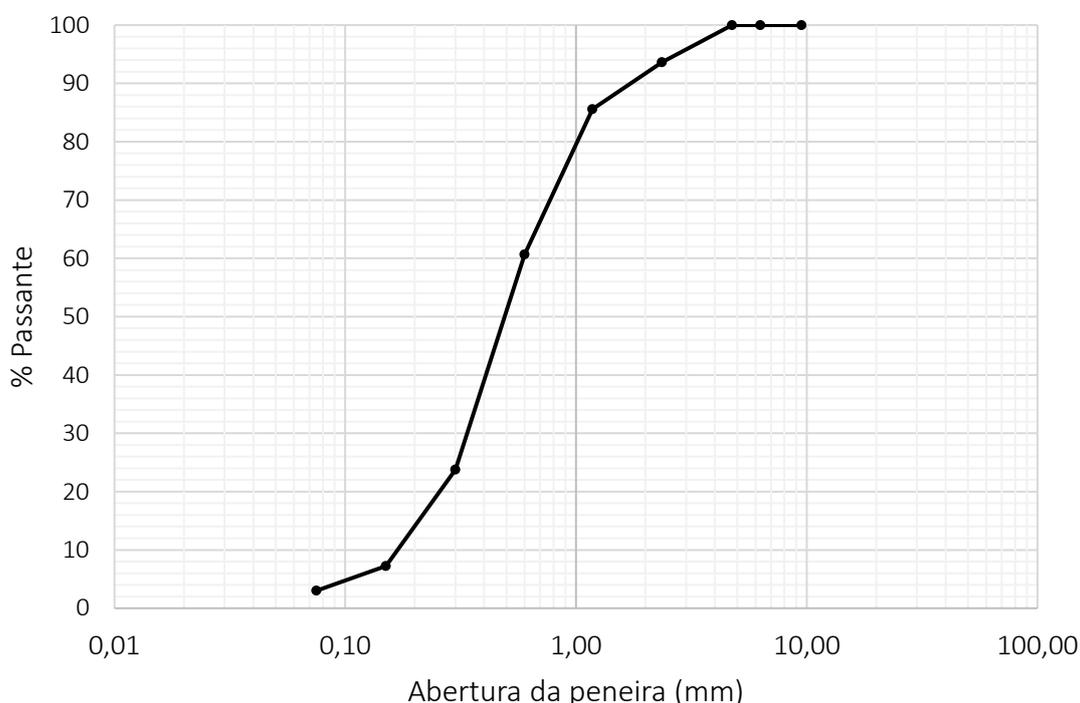
Ensaio	Metodologia	Desv.Pad.	Resultado	Exigências
Área específica - Blaine (cm <sup>2</sup> /g)	ABNT NBR 16372	113	4.190	Não aplicável
Massa específica (g/cm <sup>3</sup> )	ABNT NBR 16605	0,01	3,00	Não aplicável
Finura pela peneira 75 µm (%)	ABNT NBR 11579	0,15	0,98	≤ 12,0
Finura pela peneira 45 µm (%)	ABNT NBR 9202/85	0,78	10,27	Não aplicável
Início de pega (min)	ABNT NBR 16607	6	201	≥ 60
Fim de pega (min)	ABNT NBR 16607	6	261	≤ 600
Expansibilidade à quente (mm)	ABNT NBR 11582	-	0,1	≤ 5
Resist. à Compressão - 1 dia (MPa)	ABNT NBR 7215	0,6	12,9	Não aplicável
Resist. à Compressão - 3 dias (MPa)	ABNT NBR 7215	0,9	22,9	≥ 10,0
Resist. à Compressão - 7 dias (MPa)	ABNT NBR 7215	0,9	28,6	≥ 20,0
Resist. à Compressão - 28 dias (MPa)	ABNT NBR 7215	0,7	34,7	≥ 32,0

Fonte: Cimento Nacional (2021)

### 3.2.5 Agregado miúdo

O agregado miúdo utilizado para a realização da pesquisa foi uma areia quartzosa composta por uma mistura entre uma areia média (AM) e uma areia fina (AF), cuja proporções foram AM (70%) e AF (30%), a fim de se obter uma areia cuja granulometria fosse graduada e semelhante a que as normas NBR 5751 (ABNT, 2015) e NBR 5752 (ABNT, 2014) indicam. A areia apresenta dimensão máxima de 2,4 mm e massa específica de 2,47 g/cm<sup>3</sup>. A Figura 10 mostra a granulometria da areia utilizada nessa pesquisa.

Figura 10 – Distribuição granulométrica acumulada do agregado miúdo



Fonte: A autora (2022)

### 3.2.6 Aditivo

Para o desenvolvimento dessa pesquisa foi utilizado o aditivo superplastificante redutor de água – SPlI do tipo Hyperkem<sup>TM</sup> 40, fornecido pela empresa Novakem. O aditivo utilizado aumenta a fluidez e promove uma alta redução de água.

A necessidade do uso do aditivo deu-se principalmente a medida que se aumentou a quantidade de cinza do bagaço da cana-de-açúcar *in natura* nas composições, visto que o aumento da CBCA diminuiu a fluidez. Priorizou-se a

fixação da relação água/aglomerante nas amostras do ensaio de determinação da atividade pozolânica com cal aos sete dias normatizado pela NBR 5751 (ABNT, 2015) e nos ensaios em pastas, como o ensaio de difração de raio X para que os resultados avaliados fossem em decorrência da variação do material pozolânico utilizado nas diferentes composições.

### 3.3 PROCEDIMENTOS DE ENSAIOS

#### 3.3.1 Análises físicas

##### 3.3.1.1 Massa específica pelo uso do frasco volumétrico de Le Chatelier

Os resultados da massa específica dos materiais utilizados foram estabelecidos a partir da norma NBR 11513 (ABNT, 2016). Esta norma tem como objetivo determinar a relação entre a massa de determinada quantidade de material e o volume por ela ocupado. O procedimento consiste em colocar no frasco de *Le Chatelier* um líquido não reagente quimicamente com o material, em quantidade suficiente para que seu volume esteja compreendido entre as marcas 0 cm<sup>3</sup> e 1 cm<sup>3</sup>. Foi utilizado o querosene para garantir que a amostra não reagisse quimicamente.

Em seguida, após a imersão do líquido, submergir o frasco no banho térmico até que seja obtido o equilíbrio térmico. Depois do equilíbrio, anota-se a leitura inicial (V) bem como pesa-se a massa do frasco mais o líquido (Mi) para posteriormente identificar a massa da amostra que será ensaiada. Com o auxílio do funil, colocar cuidadosamente a amostra no frasco volumétrico com uma quantidade suficiente para causar deslocamento do líquido entre as marcas 18 cm<sup>3</sup> e 24 cm<sup>3</sup>. Após esse procedimento, submergir o frasco no banho termorregulador até que seja atingido o equilíbrio a fim de eliminar as bolhas de ar existentes. Por fim, anota-se a leitura final (Vf) e pesa-se o sistema todo para obtenção da massa final (Mf). O resultado deve ser calculado pela seguinte equação:

$$d = \frac{M}{Y}$$

Onde

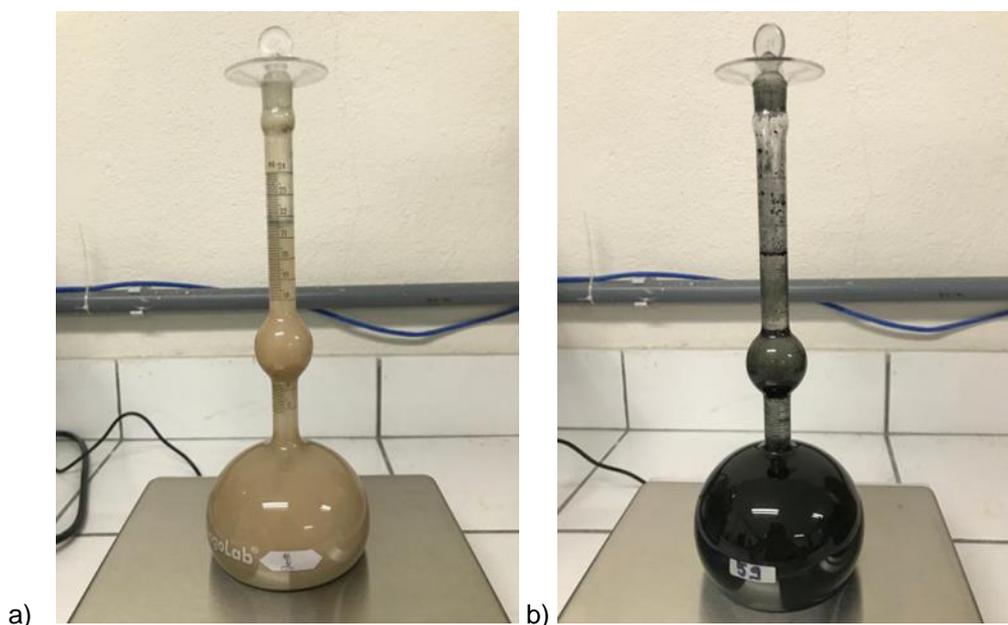
$d$  é a massa específica, expressa em gramas por centímetro cúbico (g/cm<sup>3</sup>);

$M$  é a massa da quantidade do material, expressa em gramas (g), obtida a partir da subtração da massa final do sistema ( $M_f$ ) menos a massa inicial do frasco mais líquido ( $M_i$ );

$Y$  é o volume da amostra obtido por  $V_f - V_i$ , expresso em centímetros cúbicos ( $\text{cm}^3$ ).

O resultado foi obtido a partir da média aritmética da repetição de dois resultados da mesma amostra. A Figura 11 apresenta o frasco de *Le chatelier* com a (a) Amostra de Metacaulim e (b) Amostra de CBCA.

Figura 11 – Ensaio de massa específica. a) do metacaulim. b) da CBCA



Fonte: A autora (2022)

### 3.3.1.2 Superfície específica pelo método Blaine

A superfície específica pode ser obtida a partir do tempo necessário para uma determinada quantidade de ar fluir através de uma camada de amostra compactada, de dimensões e porosidade especificadas. A determinação da superfície específica dos materiais em pó utilizados foi obtida a partir da norma NBR 16372 (ABNT, 2015), que especifica um método por meio do permeabilímetro de Blaine.

Para a execução do ensaio preparou-se a amostra homogeneizando-a por aproximadamente 1 min a 2 min movimentando um recipiente fechado para dispersão das partículas aglomeradas. Após esse procedimento, aguardou-se

cerca de 30 segundos. Em seguida, coloca-se um disco perfurado sobre a borda, no fundo da célula e sobre ele um disco de papel-filtro. Sob o disco, foi colocado na célula uma quantidade do material analisado  $m_1$ . Após nivelar a camada da amostra, executou-se a compactação da amostra por meio de um êmbolo inserido vagarosamente. Após a compactação, realizou o ensaio por meio do aparelho de permeabilidade ao ar Blaine.

A superfície específica é obtida pela expressão:

$$S = K \frac{\sqrt{\varepsilon^3} \cdot \sqrt{t}}{\rho \cdot (1 - \varepsilon) \cdot \sqrt{0,1\eta}}$$

Onde,

S é a superfície específica em massa, expressa em centímetros quadrados por grama ( $\text{cm}^2\text{g}$ );

K é a constante do aparelho;

E" é a porosidade da camada;

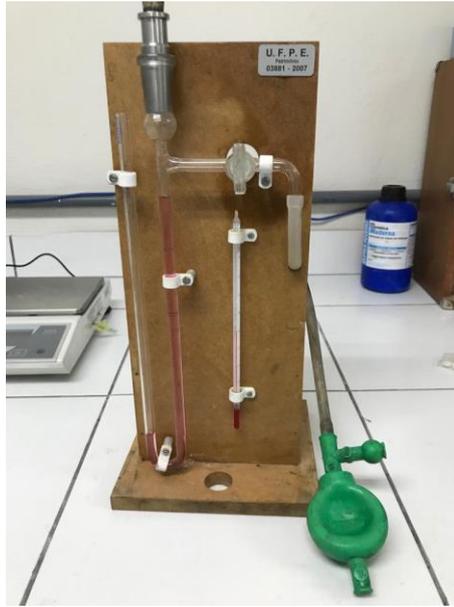
T é o tempo medido, expresso em segundos (s);

P é a massa específica da amostra, expressa em gramas por centímetro cúbico ( $\text{g}/\text{cm}^3$ );

N é a viscosidade do ar à temperatura do ensaio, expressa em pascal por centímetro ( $\text{Pa}^{1/2} \cdot \text{cm}^{-1}$ ).

O resultado final foi obtido a partir da média de duas determinações da mesma amostra. A Figura 12 demonstra o aparelho de permeabilidade ao ar Blaine na execução do ensaio.

Figura 12 – Aparelho de permeabilidade ao ar Blaine



Fonte: A autora (2022)

### 3.3.1.3 Granulometria a laser

Os materiais pulverulentos utilizados tiveram suas granulometrias mensuradas em um granulômetro a laser Malvern, modelo Mastersizer 2000, cujo limite inferior de detecção é 10nm e o superior de 2000  $\mu\text{n}$ . Esse equipamento possui a capacidade de medir a distribuição dos tamanhos das partículas dos materiais em pó, por meio da medição da variação angular na intensidade da luz difundida à medida que o laser interage com as partículas dispersas em meio líquido (MALVERN, 2017). Os resultados desse ensaio foram obtidos a partir da média aritmética de três leituras de uma mesma amostra. Além das curvas granulométricas discretas e acumuladas obtidas pelo granulômetro, foi possível determinar o diâmetro médio das partículas pelo volume e o diâmetro da partícula correspondente a 50% do material passante ( $D_{50}$ ). O granulômetro a laser Mastersizer 2000 pode ser observado na Figura 13.

Figura 13 – Granulômetro a laser Mastersizer 2000.



Fonte: A autora (2022)

### **3.3.2 Análise química**

#### **3.3.2.1 Fluorescência de Raios X**

A composição química dos materiais em porcentagem foi obtida por meio da espectrometria de fluorescência de raio X (FRX) a partir do espectrômetro de raios X modelo RIX 3000, da RIGAKU, realizada no Núcleo de Estudos Geoquímicos do Laboratório de Isótopos Estáveis (NEG-LABISE – UFPE). O princípio desse ensaio está baseado na interação dos raios X incidentes nos elétrons dos átomos que constituem a amostra. A espectrometria de fluorescência de raios-X corresponde a uma técnica não destrutiva que possui o objetivo de identificar a composição química realizando uma análise qualitativa de cada elemento que se encontra nas amostras dos materiais (OLIVEIRA, 2011). Os resultados foram obtidos a partir de uma análise semi-quantitativa em uma amostra prensada em cápsulas de alumínio.

### **3.3.3 Análise da pozolanicidade**

A análise da pozolanicidade foi desempenhada por meio dos ensaios de difração de raio X, determinação da atividade pozolânica com cal aos 7 dias e determinação do índice de desempenho com cimento Portland aos 28 dias.

#### **3.3.3.1 Determinação da reação pozolânica a partir do ensaio de difração de raios x**

A difração de raios X é uma das técnicas analíticas mais relevantes na caracterização de materiais cristalinos em pó. Esta técnica identifica as fases

crystalinas presentes no material a partir da produção de um padrão de difração composto por picos de intensidades variáveis em ângulos de difração característicos, representados por um gráfico chamado de difratograma. Durante o ensaio, quando há o espalhamento dos raios X pelos elétrons dos átomos dos cristais presentes na amostra, é possível identificar por meio da sua estrutura cristalina, os minerais presentes no material estudado.

Além da utilização deste ensaio para a caracterização dos materiais anidros, esta técnica foi utilizada em pastas com composições e proporções recomendadas pela norma NBR 5751 (ABNT, 2015), retirando o agregado miúdo. Foi preservada a relação a/agl de 0,65 para todas as misturas e com 1,00% do aditivo superplastificante. A Tabela 8 apresenta o quantitativo, em massa, para as proporções utilizadas nas pastas dos diferentes materiais pozolânicos. As proporções seguem uma mesma proporção volumétrica dos materiais.

Tabela 8 – Quantidade de material, em massa (g) utilizada em cada amostra

Mistura	Massa (g)				Água (g)	Aditivo (g)
	HC (δ=2,24)	CBCA (δ=2,11)	MTC (δ=2,57)	Fíler calcário (δ=2,74)		
100CBCA	17,33	32,65	0,00	-	32,49	0,500
95CBCA5MTC	17,33	31,02	1,99	-	32,72	0,503
90CBCA10MTC	17,33	29,39	3,98	-	32,96	0,507
85CBCA15MTC	17,33	27,76	5,97	-	33,19	0,511
80CBCA20MTC	17,33	26,12	7,95	-	33,42	0,514
75CBCA25MTC	17,33	24,49	9,94	-	33,65	0,518
70CBCA30MTC	17,33	22,86	11,93	-	33,88	0,521
65CBCA35MTC	17,33	21,23	13,92	-	34,11	0,525
60CBCA40MTC	17,33	19,59	15,91	-	34,34	0,528
55CBCA45MTC	17,33	17,96	17,90	-	34,57	0,532
50CBCA50MTC	17,33	16,33	19,89	-	34,81	0,535
45CBCA55MTC	17,33	14,69	21,88	-	35,04	0,539
40CBCA60MTC	17,33	13,06	23,86	-	35,27	0,543
35CBCA65MTC	17,33	11,43	25,85	-	35,50	0,546
30CBCA70MTC	17,33	9,80	27,84	-	35,73	0,550
25CBCA75MTC	17,33	8,16	29,83	-	35,96	0,553
20CBCA80MTC	17,33	6,53	31,82	-	36,19	0,557
15CBCA85MTC	17,33	4,90	33,81	-	36,43	0,560
10CBCA90MTC	17,33	3,27	35,80	-	36,66	0,564
5CBCA95MTC	17,33	1,63	37,79	-	36,89	0,568
100MTC	17,33	0,00	39,77	-	37,12	0,571
100FILER	17,33	-	-	42,40	38,83	0,597
100HC	52,00	-	-	-	33,80	0,520

Fonte: A autora (2022)

Após a adição de todos os materiais sólidos à água deionizada contendo o aditivo, todas as pastas foram misturadas por 2 minutos por meio de um agitador mecânico. Após a homogeneização dos materiais, todas as misturas foram colocadas em sacos plásticos de dimensão 6 cm x 24 cm e foram introduzidos em recipiente plástico cilíndrico com tampa de dimensões 3,5 cm x 5 cm. Além disso, foram envoltos por plástico filme a fim de prevenir a carbonatação das pastas e ajudar a minimizar a evaporação da água no processo da cura térmica, como é observado na Figura 14.

Figura 14 – Amostra em recipiente polimérico cilíndrico após mistura.



Fonte: A autora (2022)

Após a mistura, as pastas passaram pelos mesmos procedimentos descritos pela NBR 5751 (2015), nas quais durante as primeiras  $24 \pm 1$  h, permaneceram a temperatura de  $23 \pm 2$  °C. A fim de evitar a carbonatação, durante este período inicial, permaneceram em um dessecador a vácuo contendo sílica em gel e hidróxido de bário, que retém o CO<sub>2</sub> do ar presente no dessecador. No decorrer dos 6 dias posteriores, as amostras foram armazenadas em uma estufa a temperatura de  $55 \pm 2$  °C para finalizar a etapa da cura térmica, como mostra a Figura 15.

Figura 15 – Amostras em seu período inicial de cura térmica ( $24 \pm 1$  h) e nos 6 dias posteriores em estufa a  $55^\circ\text{C}$



Fonte: A autora (2022)

Finalizado o período de cura térmica durante 7 dias, as amostras foram imersas em nitrogênio líquido para o congelamento instantâneo da água com o objetivo de interromper a hidratação. De acordo com Scrivener (2016), normalmente o tempo de imersão em nitrogênio líquido mencionados na literatura é de 5 min – 2h. Com isso, neste ensaio o tempo de imersão foi de 5 minutos. Em seguida, as amostras foram seccionadas em pedaços menores, retirando as partes externas a fim descartar partes que possivelmente possam ter carbonatado, em seguida foram acondicionadas em novos recipientes poliméricos e estocadas em um refrigerador com temperatura de  $-30^\circ\text{C}$  até a etapa da liofilização.

No procedimento de liofilização, a amostra congelada é submetida a uma temperatura abaixo de  $-30^\circ\text{C}$  e uma pressão de alto vácuo (inferior a  $500\mu\text{Hg}$ ), seguido por um aumento gradual de temperatura durante 24 horas. Este método permite a secagem da amostra fazendo com que a água presente da mistura, passe diretamente do estado sólido para o estado gasoso, pelo processo de sublimação. Este procedimento resulta em uma amostra sem água livre, restando apenas a água quimicamente combinada e a água adsorvida na estrutura dos compostos formados, ou seja, a amostra final torna-se uma estrutura porosa livre de umidade. Ao realizar o processo de sublimação, possibilita que a amostra não continue a hidratar e assim, uniformizando o grau

de hidratação de todas as amostras. O liofilizador utilizado possui o modelo L101 da Liotop e é representado pela Figura 16.

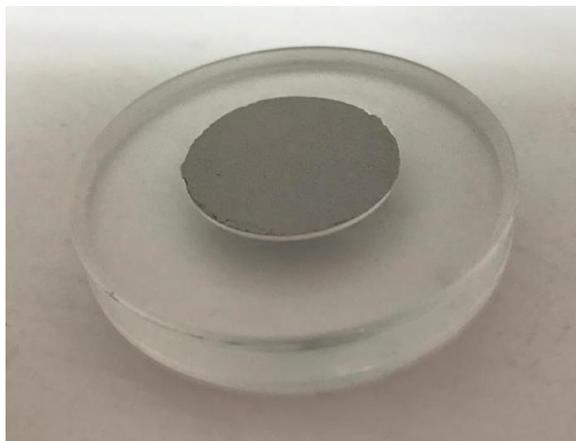
Figura 16 – Amostras no liofilizador por um período de 24 horas



Fonte: A autora (2022)

Após a liofilização, as amostras foram armazenadas novamente no dessecador até que procedesse as etapas posteriores. Em seguida, as amostras foram finamente moídas em um almofariz de ágata com pistilo por 30 segundos. A amostra moída do material passou pela peneira de abertura de malha  $75\mu\text{m}$  e o material passante foi armazenado em eppendorfs e estocados no dessecador. Para o ensaio de difração de raio X, as amostras foram preparadas realizando uma prensagem manual e rasamento do material no porta-amostra, como é observado na Figura 17.

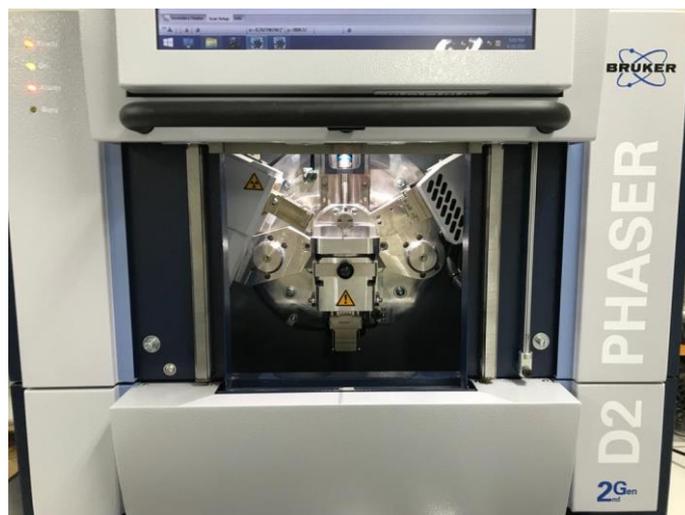
Figura 17 – Amostra moída colocada no porta-amostra para realização do ensaio de Difração de Raio X



Fonte: A autora (2022)

O ensaio de DRX em pó foi utilizado o difratômetro D2 PHASER da Bruker, com dados coletados entre os ângulos  $5^\circ$  e  $80^\circ 2\theta$ , varredura com passo angular  $0,05$  com tempo de  $0,575$  segundos por passo. A análise foi realizada por meio de um tubo com ânodo de cobre,  $30\text{kv}/10\text{mA}$  e abertura de fenda de  $1\text{mm.}$ , como é ilustrado na Figura 18.

Figura 18 – Aparelho do ensaio de difração de raio X



Fonte: A autora (2022)

### 3.3.3.2 Determinação de parâmetros de pozolanicidade com cal aos 7 dias

Este método de análise indireta da pozolanicidade tem como objetivo determinar a atividade pozolânica com cal de materiais pozolânicos no período de cura aos sete dias. Para realização deste ensaio foram moldados seis corpos de prova cilíndricos de  $50\text{ mm}$  de diâmetro e  $100\text{ mm}$  de altura de cada mistura, seguindo o quantitativo descrito pela norma NBR 5751 (ABNT, 2015) modificada ao considerar fixo a relação água/aglomerante e variar os índices de consistência, levando-se em consideração que uma variação na relação água/aglomerante pode influenciar nas propriedades mecânicas. As argamassas continham uma quantidade, em massa, de hidróxido de cálcio e uma fração de material pozolânico que corresponde ao dobro do volume de hidróxido de cálcio, seguindo a Equação a seguir. Os outros componentes da argamassa são o agregado miúdo, água deionizada e aditivo.

$$\text{Material pozolânico: } m_{poz} = 2 \cdot \frac{\delta_{poz}}{\delta_{cal}} \cdot m_{cal}$$

Onde,

$m_{\text{poz}}$  corresponde a quantidade do material mozolânico, em massa;

$m_{\text{cal}}$  corresponde a quantidade de hidróxido de cálcio, em massa;

$\delta_{\text{poz}}$  é o valor da massa específica do material pozolânico em ensaio;

$\delta_{\text{cal}}$  é o valor da massa específica do hidróxido de cálcio P.A. utilizado no ensaio.

Para a execução dos procedimentos do ensaio, a relação água/aglomerante foi fixada em 0,65 e o índice de consistência de cada amostra foi variável. A Tabela 9 apresenta a quantidade dos materiais utilizados para a confecção dos corpos de prova, bem como o índice de consistência médio ( $I_{\text{cmédio}}$ ) das amostras.

Tabela 9 – Quantidade de material, em massa (g) utilizada em cada amostra

Mistura	Massa (g)				Areia (g)	Água (g)	Aditivo (g)	$I_{\text{cmédio}}$
	HC ( $\delta=2,24$ )	CBCA ( $\delta=2,11$ )	MTC ( $\delta=2,57$ )	Fíler calcário ( $\delta=2,74$ )				
100CBCA	208	391,86	0,00	-	1872	445,44	6,853	125
95CBCA5MTC	208	372,26	23,86	-	1872	442,66	6,810	124
90CBCA10MTC	208	352,67	47,73	-	1872	439,88	6,767	127
85CBCA15MTC	208	333,08	71,59	-	1872	437,11	6,725	135
80CBCA20MTC	208	313,49	95,46	-	1872	434,33	6,682	134
75CBCA25MTC	208	293,89	119,32	-	1872	431,55	6,639	135
70CBCA30MTC	208	274,30	143,19	-	1872	428,78	6,597	159
65CBCA35MTC	208	254,71	167,05	-	1872	426,00	6,554	178
60CBCA40MTC	208	235,11	190,91	-	1872	423,22	6,511	191
55CBCA45MTC	208	215,52	214,78	-	1872	420,45	6,468	201
50CBCA50MTC	208	195,93	238,64	-	1872	417,67	6,426	203
45CBCA55MTC	208	176,34	262,51	-	1872	414,90	6,383	208
40CBCA60MTC	208	156,74	286,37	-	1872	412,12	6,340	217
35CBCA65MTC	208	137,15	310,24	-	1872	409,34	6,298	228
30CBCA70MTC	208	117,56	334,10	-	1872	406,57	6,255	236
25CBCA75MTC	208	97,96	357,96	-	1872	403,79	6,212	237
20CBCA80MTC	208	78,37	381,83	-	1872	401,01	6,169	240
15CBCA85MTC	208	58,78	405,69	-	1872	398,24	6,127	240
10CBCA90MTC	208	39,19	429,56	-	1872	395,46	6,084	250
5CBCA95MTC	208	19,59	453,42	-	1872	392,68	6,041	262
100MTC	208	0,00	477,29	-	1872	389,91	5,999	264
100FILER	208	-	-	508,86	1872	465,96	7,169	290
100HC	624	-	-	-	1872	405,60	6,240	285

Fonte: A autora (2022)

Para a execução do ensaio, inicialmente misturou-se os materiais anidros em pó, ou seja, o hidróxido de cálcio (HC) e a composição entre o metacaulim (MTC) e a cinza do bagaço da cana-de-açúcar (CBCA) durante aproximadamente 2 minutos. Em seguida, para composição da argamassa na cuba do misturador mecânico, colocou-se o aditivo na água deionizada de amassamento, e logo após, depositou-se os materiais anidros anteriormente misturados, depois adicionou-se a areia. O tempo de amassamento e o procedimento de mistura dos materiais seguiu o que descreve a norma NBR 7215 (ABNT, 2019). Além das composições estudadas, foram moldados corpos de prova com misturas de referência com 100% HC e outra mistura com Fíler e HC para análise comparativa. Após a moldagem dos corpos de prova segundo a mesma norma, o processo de cura térmica é realizado nos próprios moldes em um tempo de 7 dias. Nas primeiras 24hs, os corpos de prova foram mantidos em temperatura ambiente de  $23\pm 2$  °C. Durante as  $144 \pm 1$  h posteriores, os corpos de prova foram mantidos em estufa à temperatura de  $55\pm 2$  °C, como mostra a Figura 19. Realizou-se um tamponamento em todos os corpos de prova com tampa, plástico filme e liga elástica, com a finalidade de evitar o processo de carbonatação das misturas analisadas.

Figura 19 – Corpos de prova em estufa durante as  $144 \pm 1$  h posteriores ao período de cura inicial



Fonte: A autora (2022)

Após o período de cura térmica, os corpos de prova foram armazenados em temperatura ambiente à  $23\pm 2^{\circ}\text{C}$ , durante 2 horas, aproximadamente. Em seguida realizou-se um tratamento dos topos dos corpos de prova por meio de capeamento. Após isso, os corpos de prova foram rompidos conforme a NBR 7215 (ABNT, 2019), e a resistência à compressão obtida a partir da média aritmética das seis amostras de cada mistura. De acordo com a NBR 12653 (ABNT, 2014), para um material ser classificado como pozolânico, para a NBR 5751 (ABNT, 2015), a resistência mecânica dos corpos de prova aos 7 dias é maior ou igual a 6 MPa.

#### 3.3.3.3 Determinação de parâmetros de pozolanicidade com cimento Portland aos 28 dias

Este método analisa o índice de desempenho de materiais pozolânicos com cimento Portland aos 28 dias NBR 5752 (ABNT, 2014). De acordo com a norma, deve-se preparar argamassas contendo dois tipos de mistura, uma argamassa de referência A contendo apenas cimento CP II F 32, areia e água deionizada e outra argamassa B contendo 25% em massa do material pozolânico em substituição ao cimento Portland, além da areia e água deionizada. Para a substituição de 25% argamassa B, variou-se a quantidade de MTC e CBCA para análise dos resultados com as diferentes composições. Relativamente ao índice de consistência, o método determina que o índice da argamassa B se mantenha em  $\pm 10$  mm do obtido com a argamassa A. Caso o índice esteja menor, uma quantidade de aditivo superplastificante é necessária. O aditivo deve ser adicionado na água de amassamento diretamente na cuba. Para definição dos tipos de misturas analisadas neste ensaio, a partir dos resultados obtidos pelo ensaio da NBR 5751 (ABNT, 2015), selecionou-se oito composições das argamassas executadas no ensaio com cal para serem avaliadas com o cimento Portland. As quantidades de materiais necessárias para a moldagem de seis corpos de prova cilíndricos com dimensão 10 x 20 cm para os diferentes tipos de argamassas estão presentes na Tabela 10.

Tabela 10 – Quantidade de material, em massa (g) utilizada em cada amostra

Mistura	Material Pozolânico (g)				Areia (g)	Água (g)	Aditivo (g)	Ic <sub>médio</sub>
	CIM	CBCA	MTC	Filer calcário				
<b>100CIM</b>	624	-	-	-	1872	300	-	180
<b>100CBCA</b>	468	156	0	-	1872	300	6,24	160
<b>75CBCA25MTC</b>	468	117	39	-	1872	300	5,05	190
<b>60CBCA40MTC</b>	468	93,60	62,40	-	1872	300	4,93	189
<b>50CBCA50MTC</b>	468	78,00	78,00	-	1872	300	4,68	189
<b>30CBCA70MTC</b>	468	46,80	109,20	-	1872	300	4,24	171
<b>20CBCA80MTC</b>	468	31,20	124,80	-	1872	300	3,93	179
<b>10CBCA90MTC</b>	468	15,60	140,40	-	1872	300	3,62	171
<b>100MTC</b>	468	0	156	-	1872	300	3,43	175
<b>100FILER</b>	468	-	-	156	1872	300	-	185

Fonte: A autora (2022)

A execução do ensaio é determinada a partir da NBR 7215 (ABNT, 2019). O processo de cura se deu por duas etapas. Logo após a moldagem, os corpos de prova, ainda nos moldes, permaneceram durante 20h a 24 h, em câmara úmida. Finalizado o período inicial de cura, os corpos de prova foram desmoldados, identificados e imersos em um tanque de cura com água saturada de cal, permanecendo no tanque até o momento da ruptura aos 28 dias. Após este período, realizou-se um tratamento dos topos dos corpos de prova por meio de capeamento para execução do ensaio. A Figura 20 ilustra os corpos de prova nos moldes e desmoldados após 28 dias para realização do ensaio de resistência à compressão.

Figura 20 – Corpos de prova moldados para o ensaio



Fonte: A autora (2022)

Posteriormente a ruptura dos corpos de prova cilíndricos, a resistência à compressão foi obtida a partir da média aritmética dos resultados obtidos pelo rompimento das seis amostras de cada mistura. O índice de desempenho com cimento Portland aos 28 dias foi calculado a partir da Equação a seguir.

$$I_{cimento} = \frac{f_{CB}}{f_{CA}} \cdot 100$$

Onde

$I_{cimento}$  é o índice de desempenho com cimento Portland aos 28 dias. O resultado, expresso em porcentagem (%), deve ser arredondado ao inteiro;

$f_{CA}$  é a resistência média aos 28 dias dos corpos de prova moldados apenas com cimento CP II F-32 correspondente a argamassa A, expressa em megapascals (MPa);

$f_{CB}$  é a resistência média aos 28 dias dos corpos de prova moldados com cimento CP II-F-32 e 25 % de material pozolânico (argamassa B), aproximada ao décimo e expressa em megapascals (MPa);

Para um material ser considerado pozolânico, segundo a NBR 12653 (ABNT, 2014), com relação ao método de ensaio da NBR 5752, o índice de desempenho com cimento Portland aos 28 dias, o Índice de atividade pozolânica é de  $\geq 90\%$ .

## 4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

A partir dos dados de caracterização dos materiais obtidos e apresentados no capítulo anterior, de modo a dar seguimento na análise das componentes, neste capítulo são apresentados os resultados obtidos a partir dos experimentos de avaliação da atividade pozolânica dos materiais em estudo, por meio dos métodos diretos e métodos indiretos. Iniciou-se a análise por meio dos ensaios realizados em pastas, como o ensaio de Difração de Raio X. Em seguida, são expostos os resultados dos ensaios elaborados em argamassas, como os ensaios mecânicos para obtenção do Índice de atividade pozolânica Resistência à compressão aos 7 dias de acordo com a NBR 5751 (ABNT, 2015) e o Índice de atividade pozolânica com cimento aos 28 dias proposto pela NBR 5752 (ABNT, 2014). Em todos os experimentos, foi avaliado a mistura proposta entre o CBCA e o metacaulim em diversas proporções. A medida que as variações foram ocorrendo entre o metacaulim, considerado uma pozolana altamente reativa, e a cinza do bagaço da cana-de-açúcar, um resíduo que apresenta baixo potencial pozolânico, foi possível observar até que ponto as quantidades de metacaulim e CBCA foram misturas com potenciais pozolânicos.

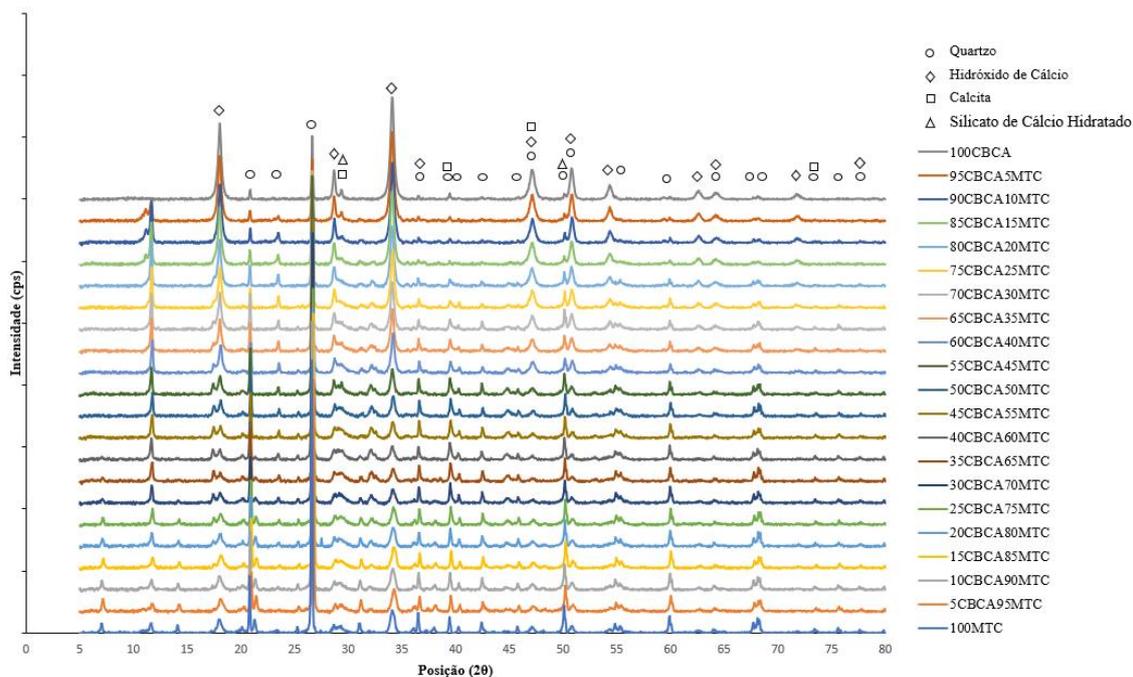
### 4.1 AVALIAÇÃO DA REAÇÃO POZOLÂNICA A PARTIR DO ENSAIO DE DIFRAÇÃO DE RAIOS X

A intensidade dos picos indicando as formações dos produtos de hidratação das pastas das misturas ternárias podem ser observados pela análise de difração de raios X (DRX). O ensaio de DRX foi realizado com o objetivo de comparar as formações dos produtos das reações entre as misturas ternárias analisadas compostas de cinza do bagaço da cana-de-açúcar *in natura*, metacaulim e hidróxido de cálcio com o mesmo traço e relação água/aglomerante utilizadas no ensaio proposto pela NBR 5751:2015 modificada. A identificação dos compostos formados foi realizada a partir do banco de dados do International Centre of Diffraction Data (ICDD), por meio do software X'Pert HighScore Plus. A análise semi-quantitativa realizada pelo software possibilita a comparação da intensidade dos principais picos observados no difratograma. Ao observar a comparação entre os resultados das diferentes misturas, pode-se observar a evolução da reação pozolânica nas pastas a partir do consumo de hidróxido de

cálcio após os procedimentos propostos pela norma e o consequente aumento da formação de Silicatos de Cálcio Hidratados (C-S-H).

Na Figura 21 estão apresentados os difratogramas das pastas das misturas ternárias contendo o CBCA *in natura*, metacaulim e hidróxido de cálcio obtidos após 7 dias de cura conforme a NBR 5751 modificada.

Figura 21 – Difratogramas de raios X das misturas ternárias com CBCA, MTC e HC



Fonte: A autora (2022)

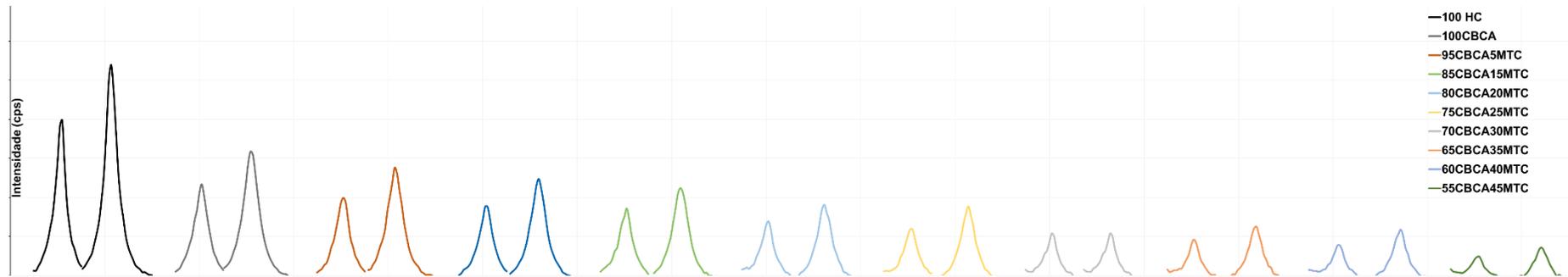
De acordo com os resultados de DRX, os difratogramas apresentam picos de quartzo ( $\text{SiO}_2$ ) provenientes da adição mineral em todas as pastas. Também podem ser identificados picos de hidróxido de cálcio ( $\text{Ca(OH)}_2$ ) e calcita ( $\text{CaCO}_3$ ) oriundos do hidróxido de cálcio P.A. utilizado nas misturas. Os picos de silicato de cálcio hidratado (C-S-H,  $3\text{CaO}_2\text{SiO}_2 \cdot x\text{H}_2\text{O}$ ) identificados ocorrem pela interação tanto do metacaulim quanto da cinza do bagaço da cana-de-açúcar, com o hidróxido de cálcio P.A. Uma vez que, os difratogramas na posição em torno de  $18,06^\circ 2\theta$  mostram a diminuição da intensidade do pico de hidróxido de cálcio ( $\text{Ca(OH)}_2$ ) à medida que a quantidade de metacaulim aumenta, indicando que quanto maior a quantidade desse material composição, mais hidróxido de cálcio é consumido para a formação de C-S-H. Em relação a quantidade de CBCA *in natura*, é possível perceber que o pico de hidróxido de cálcio das pastas

aumenta, a medida que a quantidade de CBCA *in natura* aumenta comparado as outras composições com maior porcentagem de metacaulim, indicando que quanto maior a quantidade de CBCA, menos hidróxido de cálcio é consumido para a formação de C-S-H, ou seja, menos pozolânicas são as misturas.

Nos estudos de Medeiros (2016), o DRX de amostras com a biomassa da cana de açúcar moída por 3 horas e 30 minutos mostraram a formação de C-S-H, indicando pozolanidade no material após o tratamento físico.

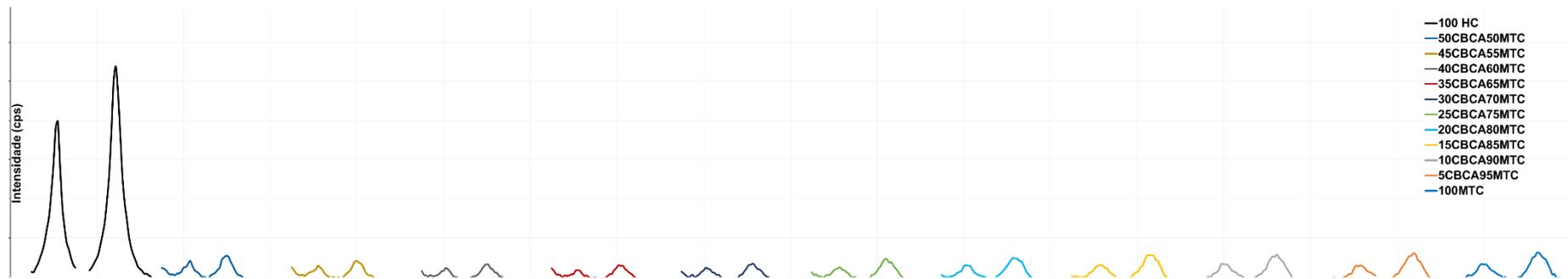
A análise da redução dos principais picos de hidróxido de cálcio nas pastas analisadas com cal não pode ser considerada uma análise exata da evolução da reação pozolânica porém pode estar associada a uma medida semi-quantitativa para análise da pozolanidade ao comparar as diferentes misturas estudadas entre a CBCA *in natura* e o metacaulim. Ao observar a Figura 22 e 23, percebe-se que a medida que a porcentagem de metacaulim aumenta com relação a CBCA, há uma diminuição dos dois principais picos de hidróxido de cálcio, relativo a evolução do consumo do hidróxido de cálcio, indicando a atividade pozolânica dos materiais.

Figura 22 – Comparação entre os picos de 18° e 34° do hidróxido de cálcio com as pastas contendo CBCA *in natura*, Metacaulim e Hidróxido de Cálcio P.A com misturas de até 55% CBCA *in natura* e 45% Metacaulim



Fonte: A autora (2022)

Figura 23 – Comparação entre os picos de 18° e 34° do hidróxido de cálcio com as pastas contendo CBCA *in natura*, Metacaulim e Hidróxido de Cálcio P.A com misturas de até 50% CBCA *in natura* e 50% Metacaulim até a proporção de 100% Metacaulim

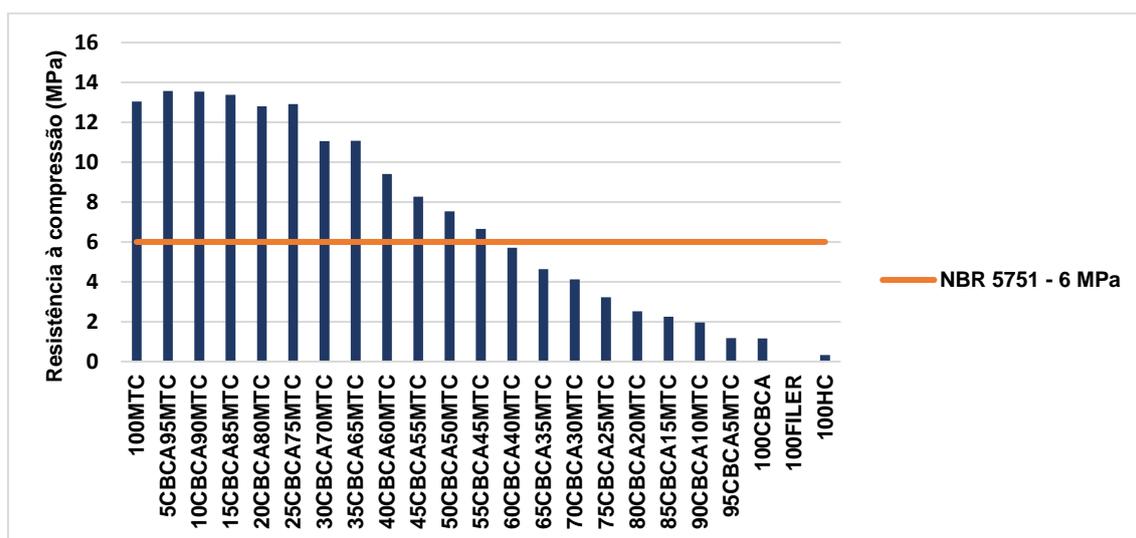


Fonte: A autora (2022)

## 4.2 ANÁLISE DOS PARÂMETROS DE POZOLANICIDADE COM CAL AOS 7 DIAS

Na Figura 24 e no Apêndice A são apresentados os valores da resistência à compressão aos 7 dias das argamassas compostas por cinza do bagaço da cana-de-açúcar (CBCA), metacaulim (MTC) e o hidróxido de cálcio P.A. De acordo com a NBR 12653 (ABNT, 2014), para um material ser classificado como pozolânico a partir do índice de atividade pozolânica proposto pela NBR 5751 (ABNT, 2015) é necessário que a resistência à compressão seja igual ou superior a 6 MPa.

Figura 24 – Resistência à compressão das argamassas das misturas ternárias contendo CBCA, Metacaulim e hidróxido de cálcio P.A. aos 7 dias



Fonte: A autora (2022)

A medida que o teor de MTC aumenta em relação ao teor de CBCA, há um incremento no valor da resistência mecânica à compressão das argamassas. Ainda na Figura 24, é possível observar que a partir da argamassa 55%CBCA45%MTC até 100MTC, essas misturas atingem a resistência à compressão mínima para serem classificadas como pozolânicas. A partir do valor de substituição de mais de 55% de CBCA *in natura* nas composições, os valores obtidos para a resistência mecânica começaram a decrescer proporcionalmente, isto pode ser explicado devido a CBCA *in natura* em seu processamento ter sofrido uma queima com temperaturas não controladas e

inadequadas e não ter passado por processos químicos neste estudo, apresentando ainda um elevado teor de carbono, além da cristalinidade elevada presente em sua estrutura.

Medeiros et al. (2015) reforça que essa metodologia indireta de determinação de atividade pozolânica, não distingue os efeitos físico e químico das adições minerais, sendo, portanto, o resultado experimental a expressão da influência conjunta das propriedades. Como pode se observar, em uma substituição de até 15% de CBCA nas misturas com o metacaulim, houve um discreto aumento do valor, o que poderia ser justificado por algum efeito *filler* de preenchimento de vazios proporcionado pela quantidade de cinza do bagaço da cana-de-açúcar inserida na composição da argamassa. As argamassas de fíler calcário, consideradas inertes, apresentaram resistência muito abaixo do limite preconizado em norma. Esse comportamento é esperado pois não há reação química significativa entre o hidróxido de cálcio e o fíler calcário.

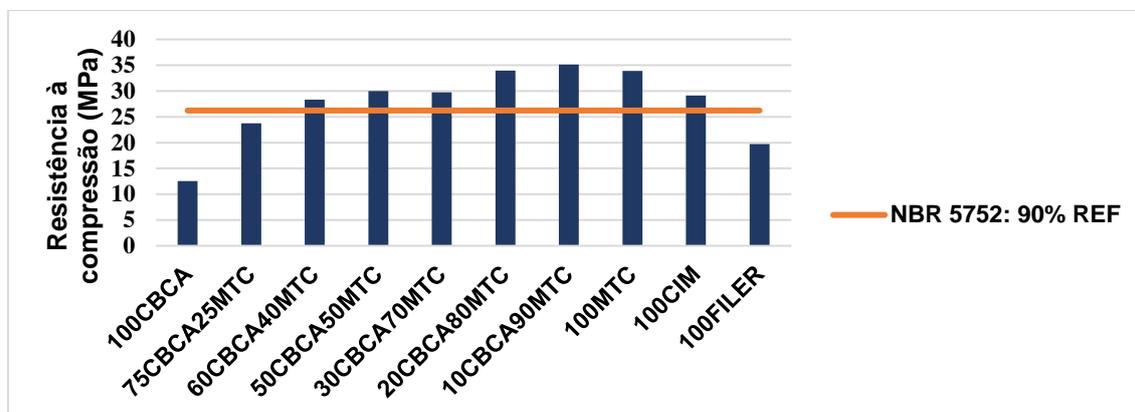
Conforme Costa (2017) todas as amostras estudadas de CBCA, à medida que se incluía em sua matriz os percentuais de metacaulim, seus valores de resistência a compressão aumentaram. Para as amostras de CBCA *in natura* sem moagem e passante na peneira nº400 (0,038mm) com relação a resistência a compressão, só apresentaram valores maiores que os limites a partir da inclusão de 30 e 50% de MTC em sua matriz.

De acordo com os estudos de Mello (2019), foram analisadas amostras de Metacaulim com cal hidratada e amostras de Resíduo de bagaço de cana com cal hidratada, separadamente, obtendo a resistência de 14,51 MPa e 2,63 MPa, respectivamente, correspondendo a valores semelhantes ao encontrados nesse estudo.

### 4.3 ANÁLISE DOS PARÂMETROS DE POZOLANICIDADE COM CIMENTO PORTLAND AOS 28 DIAS

O índice de atividade pozolânica (IAP) avaliado com cimento Portland normatizada pela NBR 5752 (2014) foi determinado para as amostras das misturas entre cinza do bagaço da cana-de-açúcar e metacaulim, bem como das amostras de referência de cimento Portland do tipo CP II-F 32 e fíler. Os resultados podem ser observados na Figura 25.

Figura 25 – Resistência à compressão das argamassas das misturas ternárias contendo CBCA, Metacaulim e CP II F 32 aos 28 dias



Fonte: A autora (2022)

A resistência à compressão da argamassa de referência (100CIM), sem adição do material estudado foi de 29,14 MPa. De acordo com a norma, o IAP é equivalente a 90% ou mais do valor de referência para que o material analisado seja considerado um material pozolânico para utilização com o cimento Portland (ABNT NBR 12653, 2014). É possível observar que os corpos de prova moldados com a proporção de 60CBCA40MTC, 50CBCA50MTC, 30CBCA70MTC, 20CBCA80MTC, 10CBCA90MTC e a amostra contendo 100MTC como material pozolânico, obtiveram valores superiores ao parâmetro mínimo de pozolanicidade proposto pela norma.

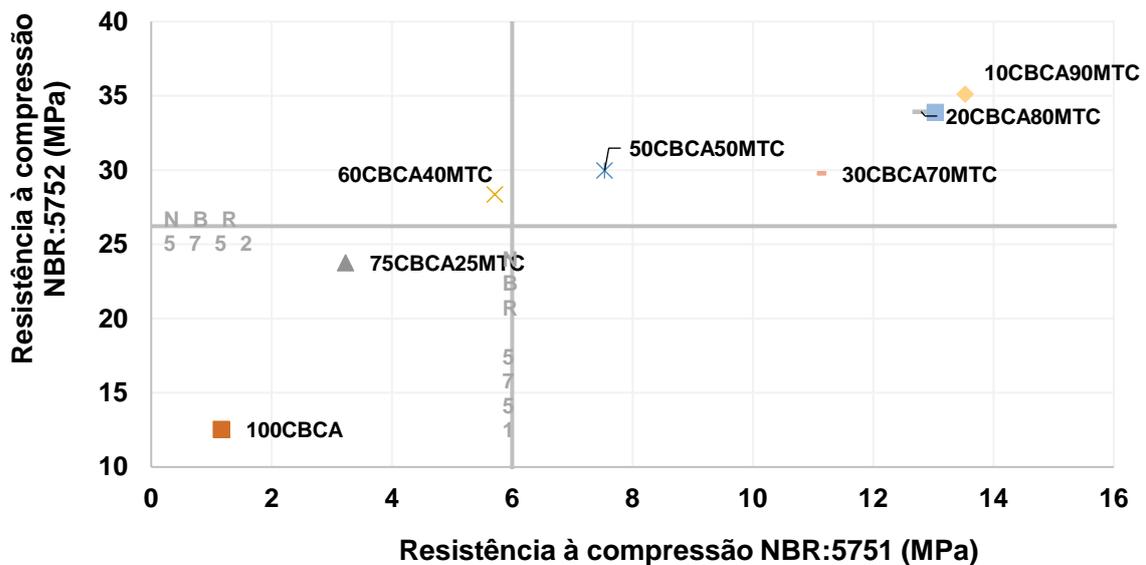
Como alternativa ecológica ao concreto de cimento Portland convencional, os estudos de Li et. al. (2022) avaliaram geopolímeros binários de metacaulim que permitam uma substituição de CBCA e constataram que o CBCA quando combinado com o metacaulim, o geopolímero binário MTC-CBCA exibe uma

resistência mecânica superior até uma substituição máxima de 50% de CBCA. Destaca-se que a CBCA utilizada passou por processos químicos e físicos para obter tais resultados.

#### 4.4 ANÁLISE DA CORRELAÇÃO ENTRE OS ÍNDICES DE ATIVIDADE POZOLÂNICA COM CAL E COM CIMENTO PORTLAND

Ao analisar a correlação entre os resultados do ensaio da NBR 5751:2015 modificada e NBR 5752:2014 percebe-se que as misturas contendo até no máximo 50% CBCA *in natura* quando misturadas com o metacaulim, podem ser consideradas materiais com potencial pozolânico para ambas as normas. A correlação entre os resultados obtidos nos ensaios pode ser observada na Figura 26 e Apêndice B.

Figura 26 – Correlação entre as resistências à compressão da NBR 5751 modificada e NBR 5752



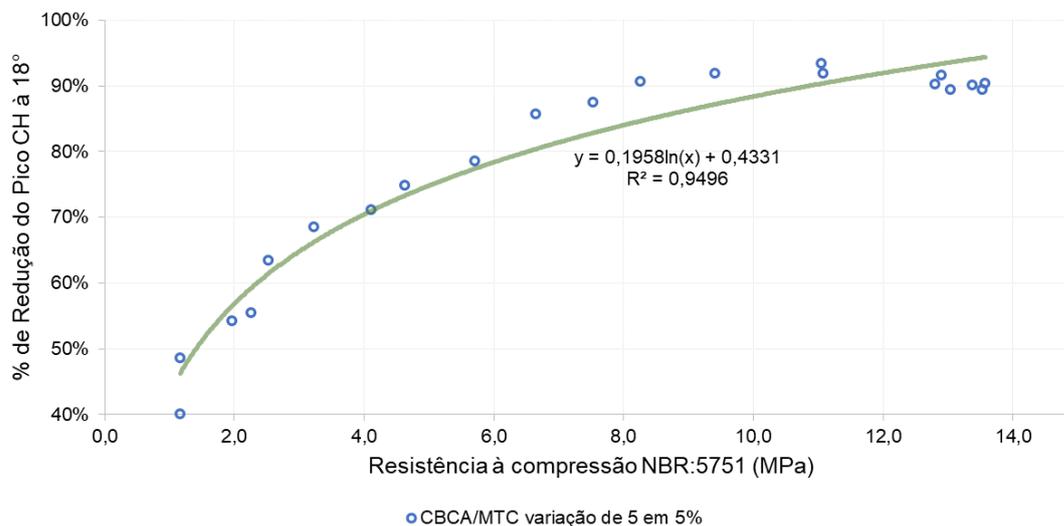
Fonte: A autora (2022)

Dentre os resultados, é possível observar que a amostra de composição 60CBCA40MTC não foi considerada um material pozolânico para o ensaio de resistência a compressão com cal, porém para o limite a norma de determinação pozolânica com cimento alcançou o limite mínimo. Isto pode ser explicado por a norma NBR 5752 possibilitar a avaliação não só do efeito pozolânico, mas também do efeito filer existente nos materiais, principalmente na CBCA *in natura*.

#### 4.5 ANÁLISE DA CORRELAÇÃO ENTRE OS ÍNDICES DE ATIVIDADE POZOLÂNICA COM CAL E A REDUÇÃO (%) DOS PRINCIPAIS PICOS (18° e 34°) DO ENSAIO DE DIFRAÇÃO DE RAIO X

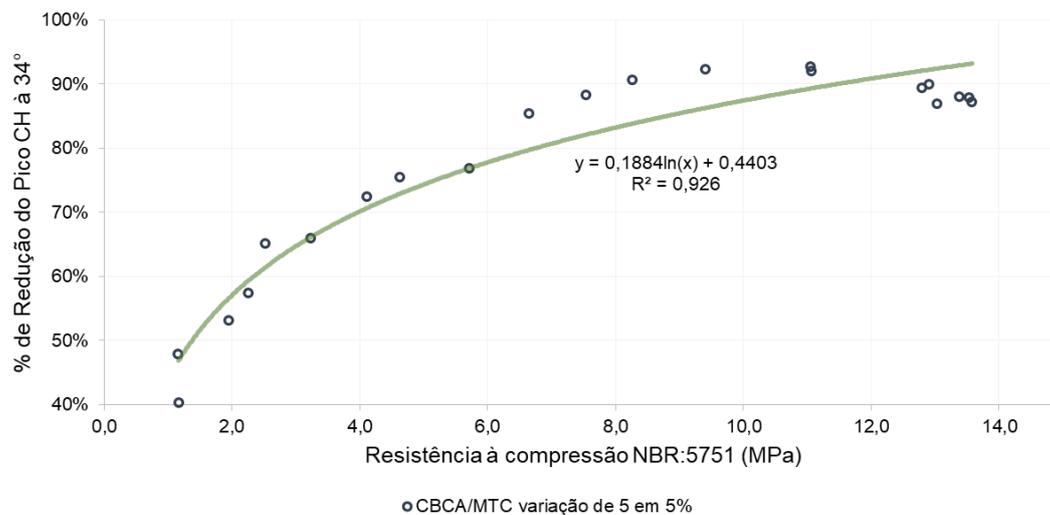
Ao observar conjuntamente os resultados obtidos para as composições ternárias entre CBCA *in natura*, metacaulim e cal hidratada, é possível analisar na Figura 27 e Figura 28 a correlação entre a diminuição dos principais picos de HC (18° e 34°) encontrados no ensaio de DRX com os resultados mecânicos atingidos no ensaio proposto pela NBR 5751 modificada. Ao analisar os gráficos, percebe-se que as composições que foram consideradas pozolânicas pela norma 5751 por apresentar valores superiores a 6 MPa, obtiveram uma porcentagem de redução dos picos de no mínimo 85,67% para o pico a 18° e uma redução de no mínimo 85,36% para o pico a 34°. Essa correlação obtida confirma a indicação de atividade pozolânica das composições a partir da análise semi-quantitativa da redução dos principais picos do Hidróxido de cálcio.

Figura 27 – Correlação entre a redução (%) do pico de hidróxido de cálcio à 18° e a resistência à compressão obtida pela NBR:5751 modificada (MPa)



Fonte: A autora (2022)

Figura 28 – Correlação entre a redução (%) do pico de hidróxido de cálcio à 34° e a resistência à compressão obtida pela NBR:5751 modificada (MPa)



Fonte: A autora (2022)

## 5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

### 5.1 CONCLUSÕES

A partir dos resultados apresentados foi possível obter as seguintes conclusões:

- Ao analisar as 21 amostras de misturas ternárias variando a porcentagem de cinza do bagaço da cana-de-açúcar e metacaulim de 5 em 5%, a partir do ensaio de determinação do índice de atividade pozolânica com cal pela NBR 5751:2015 modificada, é possível identificar que as adições de até 55% CBCA *in natura* em composições com metacaulim podem ser consideradas como materiais pozolânicos.
- A partir do ensaio de determinação do índice de desempenho de materiais pozolânicos com cimento Portland aos 28 dias, as cinzas com até 60% de CBCA *in natura* em misturas com metacaulim podem ser consideradas pozolanas.
- Através das análises mineralógicas a partir dos difratogramas obtidos pela difração de raios X, foi possível perceber a formação de compostos hidratados bem como do consumo do hidróxido de cálcio por meio da redução da intensidade dos principais picos característicos, comprovando a ocorrência da reação pozolânica.
- De acordo com os resultados obtidos em todo o programa experimental, percebeu-se a potencialidade do uso da cinza do bagaço da cana-de-açúcar *in natura* ao ser misturadas com o metacaulim, pozolana já conhecida pela sua reatividade, formando misturas ternárias com a cal hidratada ou cimento Portland.
- Com isso, a CBCA *in natura*, sem processamento, quando aliada ao metacaulim, pode ser considerada um material alternativo para a produção de argamassas e aplicação em substituição ao cimento Portland. Desta forma, a destinação inapropriada da cinza gerada na produção da cana-de-açúcar, bem como a geração elevada de dióxido de carbono no processo de fabricação de cimento podem ser minimizados com a utilização do resíduo como adição mineral ao cimento Portland.

## 5.2 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

A partir do desenvolvimento desta pesquisa, algumas sugestões para trabalhos futuros para continuidade do tema podem ser destacadas, como:

- Análise das reações da CBCA *in natura* e metacaulim através da difração de raios X em pastas com cal com idades mais avançadas, como 28 dias, e também em pastas com cimento Portland simulando a NBR 5752. Ainda, avaliar de forma quantitativa o consumo de HC por meio do método de Ritveld;
- Determinação do consumo de hidróxido de cálcio pelas reações pozolânicas por meio de análise termogravimétrica e identificação do C-S-H formado como produto de hidratação utilizando microscópio eletrônico de varredura;
- Avaliação do potencial pozolânico das misturas entre cinzas do bagaço da cana-de-açúcar e metacaulim utilizando outros métodos para determinação da pozolanicidade além dos desenvolvidos nesta pesquisa;
- Verificar se há viabilidade econômica e financeira para produção comercial do novo material estudado.

## REFERÊNCIAS

- ABRÃO, P. C. R. A. **O uso de pozolanas como materiais cimentícios suplementares: disponibilidade, reatividade, demanda de água e indicadores ambientais**. 2019. 143p. Dissertação (Mestrado) - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2019.
- ANJOS, M.A.S., CAMÕES, A., CAMPOS, P., AZEREDO, G.A., FERREIRA, R.L.S. Effect of high volume fly ash and metakaolin with and without hydrated lime on the properties of self-compacting concrete. **Journal of Building Engineering**, v.27, 100985, 2019.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5751**: Materiais pozolânicos – Determinação da atividade pozolânica com cal aos sete dias. 3 ed. Rio de Janeiro, 2015. 8 p.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5752**: Materiais pozolânicos – Determinação do índice de desempenho com cimento Portland aos 28 dias. 3 ed. Rio de Janeiro, 2014. 8 p.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5756**: Cimento Portland - Ensaio de pozolanicidade para cimento Portland pozolânico. 3 ed. Rio de Janeiro, 2016. 17 p.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7215**: Cimento Portland - Determinação da resistência à compressão de corpos de prova cilíndricos. Rio de Janeiro, 2019. 12 p.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 11513**: Materiais granulares usados em fundição - Determinação da massa específica pelo uso do frasco volumétrico de "Le Chatelier". 2 ed. Rio de Janeiro, 2016. 7 p.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 12653**: Materiais pozolânicos — Requisitos. Rio de Janeiro, 2014. 10 p.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 15894-1**: Metacaulim para uso com cimento Portland em concreto, argamassa e pasta Parte 1 - Requisitos. Rio de Janeiro, 2010. 12 p.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 15895**: Materiais pozolânicos — Determinação do teor de hidróxido de cálcio fixado – método Chapelle modificado. Rio de Janeiro, 2010. 10 p.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 16372**: Cimento Portland e outros materiais em pó – Determinação da finura pelo método de permeabilidade ao ar (método de Blaine). 1 ed. Rio de Janeiro, 2015. 15 p.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 16697**: Cimento Portland – Requisitos. Rio de Janeiro, 2018. 12 p.
- ASTUTININGSIH, S., SURYA, W., ZAKIYUDDIN, A. Comparison of the Compressive Strength and the Microstructure of Metakaolin Metastar and Metakaolin Bangka as Additive in Ordinary Portland Cement. **E3S Web of Conferences**, v. 67, 2018.

- BASTO, P. E. de A. **Determinação da pozzolanicidade por condutividade elétrica do lodo de estações de tratamento de esgoto (ETE) para adição ao cimento Portland**. 2018. 99p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2018.
- CHUSILP, N., JATURAPITAKKUL, C., KIATTIKOMOL, K. Utilization of bagasse ash as a pozzolanic material in concrete. **Construction and Building Materials**, v 23(11), p. 3352–3358, 2009.
- CORDEIRO, G. C., FILHO, R. D. T., ALMEIDA, R. S. Influence of ultrafine wet grinding on pozzolanic activity of submicrometre sugar cane bagasse ash. **Advances in Applied Ceramics**, v. 110(8), p. 453–456, 2011.
- CORDEIRO, G. C., TAVARES, L. M., TOLEDO FILHO, R. D. Improved pozzolanic activity of sugar cane bagasse ash by selective grinding and classification. **Cement and Concrete Research**, v. 89, p. 269–275, 2016.
- 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.
- COSTA, L. F. **Estudo do bagaço da cana de açúcar como material para construção civil no estado de Pernambuco - sistema ternário com metacaulim e cal hidratada**. 2017. 86p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil e Ambiental) - Universidade Federal de Pernambuco, Caruaru, 2017.
- DONATELLO, S., TYRER, M., CHEESEMAN, C. R. Comparison of test methods to assess pozzolanic activity. **Cement and Concrete Composites**, v. 32(2), p. 121–127, (2010).
- FERNANDES, S. E., TASHIMA, M. M., MORAES, J. C. B., ISTUQUE, D. B., FIORITI, C. F., MELGES, J. L. P., AKASAKI, J. L. Cinza de bagaço de cana-de-açúcar (CBC) como adição mineral em concretos para verificação de sua durabilidade. **Revista Materia**, v. 20(4), p. 909–923, 2015.
- FERNANDES, A. J. M. M. **Influência do teor de sílica e alumina no comportamento pozolânico de materiais cimentícios suplementares**. 2018. 165p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade do Vale do Rio dos Sinos, São Leopoldo, 2018.
- FERREIRA, R. T. L. **Influência da requeima na pozzolanicidade de cinzas de bagaço de cana-de-açúcar de diferentes características**. 2015. 64 p. Dissertação (Mestrado em Construção Civil) - Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2015.
- FRÍAS, M., VILLAR-COCIÑA, E. Influence of calcining temperature on the activation of sugar-cane bagasse: Kinetic parameters. **Advances in Cement Research**, v. 19(3), p. 109–115, 2007.
- FROHLICH, J. **Uso de resíduo cerâmico em cimentos ternários tipo LC3: Estudo dos produtos da hidratação**. 2019. 225 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade do Vale do Rio dos Sinos, São Leopoldo, 2019.

GARDOLINSKI, J. E.; MARTINS FILHO, H. P.; WYPYCH, F. Comportamento térmico da caulinita hidratada. **Química Nova**, v.26, n.1, p.30-35, 2003.

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 Materia**, v. 22(3), 2017.

IRASSAR, E., RAHAL, V., TIRONI, A., TREZZA, M., PAVLÍK, Z., PAVLÍKOVÁ, M., JERMAN, M., CERNÝ, R. Utilization of ceramic wastes as pozzolanic materials. **Clean Technology 2014: Energy, Renewables, Environment & Materials**, p. 316–319, 2014.

KALPOKAITE-DICKUVIENE, R., BALTUSNIKAS, A., LEVINSKAS, R., CESNIENE, J., Incinerator residual ash – metakaolin blended cements: effect on cement hydration and properties. **Construction and Building Materials**. v. 206. p. 297–306, 2019.

KAWASHIMA, S., HOU, P., CORR, D. J., SHAH, S. P. Modification of cement-based materials with nanoparticles. **Cement and Concrete Composites**, v. 36, p. 8–15, 2013

KHALIL, M. J., ASLAM, M., AHMAD, S. Utilization of sugarcane bagasse ash as cement replacement for the production of sustainable concrete – A review. **Construction and Building Materials**, v. 270, 2021.

KOLAWOLE, J. T., BABAFEMI, A. J., FANIJO, E., PAUL, S.C., COMBRINCK, R. State-of-the-art review on the use of sugarcane bagasse ash in cementitious materials. **Cement and Concrete Composites**, v. 118, 103975, 2021.

LI, L. G., HUANG, Z. H., ZHU, J., KWAN, A. K. H., CHEN, H. Y. Synergistic effects of micro-silica and nano-silica on strength and microstructure of mortar. **Construction and Building Materials**, v. 140, p. 229–238, 2017.

LI, L. G., ZHENG, J. Y., ZHU, J., KWAN, A. K. H. Combined usage of micro-silica and nano-silica in concrete: SP demand, cementing efficiencies and synergistic effect. **Construction and Building Materials**, v. 168, 622–632, 2018.

LI, J., TÃO, Y., ZHUANG, E., CUI, X., YU, K., YU, B., BOLUK, Y., BINDIGANAVILE, V., CHEN, Z., YI, C. Optimal amorphous oxide ratios and multifactor models for binary geopolymers from metakaolin blended with substantial sugarcane bagasse ash. **Journal of Cleaner Production**. v.377, 134215, 2022.

LUXÁN, N.P.; XADRUGA, F.; SAAVEDRA, J. Rapid evaluation of pozzolanic activity of natural products by conductivity measurement. **Cement and Concrete Research**, v.19, p. 63-68, 1989.

MALVERN INSTRUMENTS. **Sample dispersion and refractive index guide: Mastersizer 2000 – Reference Manual 0396**. Worcestershire: Malvern, 2007.

\_\_\_\_\_. **Difração laser: Distribuição de tamanho de partículas desde nanômetros até milímetros**. 2017. Disponível em:

<<https://www.malvern.com/br/products/technology/laser-diffraction>>. Acesso em: 06 nov. 2022.

MARTINS, G. L. O. **Influência do teor de sílica amorfa na atividade pozolânica de adições minerais altamente reativas**. 2018. 131 p. Dissertação (Mestrado em estruturas e construção civil) - Universidade de Brasília, Brasília, 2018.

MASSANA, J., REYES, E., BERNAL, J., LEÓN, N., SÁNCHEZ-ESPINOSA, E. Influence of nano- and micro-silica additions on the durability of a high-performance self-compacting concrete. **Construction and Building Materials**, v. 165, p. 93–103, 2018.

MASSAZZA, F.. Pozzolana and pozzolanic cements. In: ewlett, P. . ed), **Lea's chemistry of cement and concrete**, 4 ed. New York: J. Wiley, p. 471-631, 1998.

MEDEIROS, M. H. F., HOPPE FILHO, J., GOBBI, A., PEREIRA, E. Pozolanas de elevada reatividade: uma avaliação crítica do ensaio de Índice de Atividade Pozolânica (IAP) com cal usando Difração de Raios X. **Ambiente Construído**, v. 15(3), p. 19–29, 2015.

MEDEIROS, F. K. **Estudo de concretos autoadensáveis com reduzidos teores de cimento e elevados teores de adições minerais**. 2016. 133 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2016.

MEDINA, E. A. **Pozolanicidade do metacaulim em sistemas binários com Cimento Portland e hidróxido de cálcio**. 2011. 134 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia) - Universidade de São Paulo, São Paulo, 2011.

MEHROTRA, S. O., MASOOD, I. Pozzolanic behaviour of bagasse ash: A derivative of sugar cane distillation, bagasse ash, has properties that might be suitable for use in building materials. **Building Research & Information**, v 20(5), p. 299–304, 1992.

MEHTA, P. K.; MONTEIRO, P. J. M. **Concreto: Microestrutura, Propriedades e Materiais**, 2014. 2 ed. 751 p. São Paulo: Ibracon, 2014.

MELLO L. C. A. **Efeitos das elevadas temperaturas em concretos autoadensáveis com altos teores de resíduo da biomassa da cana-de-açúcar e metacaulim**. 2019. 90 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2019.

NUNES, N. G. C. **Caracterização das interações soluto (ou substrato) – solvente - solvente em misturas ternárias**. 2010. 509 p. Tese (Doutoramento em química) - Universidade de Lisboa, Lisboa, 2010.

OLIVEIRA, E. A. **Confiabilidade metrológica na determinação de espécies químicas em materiais siderúrgicos por espectrometria de fluorescência de raios-X**. 2011. 115 p. Dissertação (Mestrado em Metrologia) – Universidade Católica do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2011.

OLTULU, M., ŞAHIN, R. Pore structure analysis of hardened cement mortars containing silica fume and different nano-powders. **Construction and Building**

**Materials**, v. 53, p. 658–664, 2014.

PERIM, J. R. **Influência do metacaulim na durabilidade de concretos usuais de mercado sujeitos à carbonatação acelerada**. 2013. 176 p. Dissertação ( Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade Federal de Goiás, Goiana, 2013.

QUARCIONI, V. A., CHOTOLI. F. F., COELHO, A. C. V., CINCOTTO. M. A. Métodos de ensaio indiretos e método Chapelle direto para determinação do consumo de cal pelos materiais pozolânicos. **Revista Ibracon de estruturas e materiais**, São Paulo, v.8(1), p.1-7, 2015.

RAHEEM, A. A., ABDULWAHAB, R., KAREEM, M. A. Incorporation of metakaolin and nanosilica in blended cement mortar and concrete- A review. **Journal of Cleaner Production**, v. 290, 125852, 2021.

RODRIGUES, M. P. S. F. F. **Argamassas de revestimento para alvenarias antigas Contribuição para o estudo da influência dos ligantes**. 2004. 454 p. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) - Universidade Nova de Lisboa, Lisboa, 2004.

SALLABERRY, A. P. N. **Análise da atividade pozolânica da cinza da folha da bananeira pelos métodos da ABNT NBR 5752: 2014 e da condutividade elétrica**. Trabalho de conclusão de curso - Departamento de Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2019.

SCHLORHOLTZ, S. Development of performance of ternary mixes: Scoping study. Rep. No. DTFH61-01-X-00042 (Project 13), **Center for Portland Cement Concrete Pavement Technology**, Ames, IA, 2014.

SCRIVENER, K.; SNELLINGS, R.; LOTHENBACH, B. **A practical guide to microstructural analysis of cementitious materials**. [s.l.] Crc Press, 2016.

SHEHAB EL-DIN, H. K., EISA, A. S., ABDEL AZIZ, B. H., IBRAHIM, A. Mechanical performance of high strength concrete made from high volume of Metakaolin and hybrid fibers. **Construction and Building Materials**, v. 140, p. 203–209, 2017.

SILVA, E. J. **Utilização do método de condutividade elétrica para análise da pozolanicidade da cinza do bagaço de cana-de-açúcar**. 2016. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil e Ambiental) - Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil e Ambiental, Universidade Federal de Pernambuco, Caruaru, 2016.

SINDICATO NACIONAL DA INDÚSTRIA DO CIMENTO (SNIC). **Relatório Anual**, 2020. 52 p. Disponível em: <[http://snic.org.br/assets/pdf/relatorio\\_anual/rel\\_anual\\_2020.pdf](http://snic.org.br/assets/pdf/relatorio_anual/rel_anual_2020.pdf)>. Acesso em: 01 nov. 2022.

SNELLINGS, R.; SCRIVENER, K.L.. Rapid screening tests for supplementary cementitious materials: past and future. **Materials and Structures**, v. 49, p. 3265– 3279, 2016.

SOARES, E. N. C., **Avaliação da atividade pozolânica das cinzas do capim elefante por análise termogravimétrica e ensaio de variação de**

- condutividade elétrica em solução de hidróxido de cálcio.** 2017. 77 p. Dissertação (Mestrado em Construção Civil) - Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2017.
- SOUZA, L. M. S.; FAIRBAIRN, E. M. R.; CORDEIRO, G. C. ; TOLEDO, R. D. Hydration study of sugar cane bagasse ash and calcium hydroxide pastes of various initial c/s ratios. **Proceedings Pro083 : Microstructural-Related Durability of Cementitious Composite**, 2012.
- SOUSA, M. I. C. **Microestrutura de pastas de cimento ternárias com metacaulim e nanossílica.** 2019. 123 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade de Brasília, Brasília, 2019.
- TAVARES, J. C. **Potencialidade do uso da cinza da folha da bananeira como substituição parcial do cimento Portland em concretos.** 2019. 81 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2019.
- TIRONI, A., TREZZA, M. A., SCIAN, A. N., IRASSAR, E. F. Assessment of pozzolanic activity of different calcined clays. **Cement and Concrete Composites**, v.37(1), p. 319–327, 2013.
- TIRONI, R.; TREZZA, M.A.; SCIAN, A. N.; IRASSAR, E.F. Thermal analysis to assess pozzolanic activity of calcined kaolinitic clays. **Journal of Thermal Analysis and Calorimetry**, v.117, p.547-556, 2014.
- VILLAR-COCIÑA, E. **Modelos cinéticos para la caracterización de materiales puzolánicos y mezclas de moldeo para fundición de hierro.** 2005. 168 p. Tese (Doutorado em Ciências Físicas) – Facultad de Matemática, Física y Computación, Universidad Central “Martha Abreu” de las Villas, Santa Clara, Villa Clara, Cuba, 2005.
- XU, Q., JI, T., GAO, S. J., YANG, Z., WU, N. Characteristics and applications of sugar cane bagasse ash waste in cementitious materials. **Materials**, v. 12(1), p. 1–19, 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, 118854, 2020.
- YURDAKUL, E., TAYLOR P.C., CEYLAN, HALIL., BEKTAS, F. Effect of Water-to-Binder Ratio, Air Content, and Type of Cementitious Materials on Fresh and Hardened Properties of Binary and Ternary Blended Concrete. **Journal of materials in Civil Engineering**, v. 26, 04014002, 2014.

**APÊNDICE A – RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO DAS ARGAMASSAS DAS MISTURAS TERNÁRIAS CONTENDO CBCA, Metacaulim e hidróxido de cálcio P.A. aos 7 dias.**

Tabela 11 – Resistência à compressão das argamassas das misturas ternárias contendo CBCA, Metacaulim e hidróxido de cálcio P.A. aos 7 dias

<b>Resultados</b>	
<b>Amostra</b>	<b>RESISTENCIA À COMPRESSÃO (Mpa)</b>
100MTC	13,04
5CBCA95MTC	13,58
10CBCA90MTC	13,53
15CBCA85MTC	13,38
20CBCA80MTC	12,80
25CBCA75MTC	12,91
30CBCA70MTC	11,06
35CBCA65MTC	11,07
40CBCA60MTC	9,41
45CBCA55MTC	8,27
50CBCA50MTC	7,54
55CBCA45MTC	6,65
60CBCA40MTC	5,71
65CBCA35MTC	4,63
70CBCA30MTC	4,12
75CBCA25MTC	3,23
80CBCA20MTC	2,53
85CBCA15MTC	2,25
90CBCA10MTC	1,96
95CBCA5MTC	1,17
100CBCA	1,16
100FILER	0,02
100HC	0,33

Fonte: A autora (2022)

## APÊNDICE B – RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO DAS ARGAMASSAS DAS MISTURAS TERNÁRIAS CONTENDO CBCA, Metacaulim e cimento Portland aos 28 dias.

Tabela 12 – Resistência à compressão das argamassas das misturas ternárias contendo CBCA, Metacaulim e cimento Portland aos 28 dias

	100CIM	100CBCA	75CBCA25 MTC	60CBCA40 MTC	50CBCA50 MTC	30CBCA70 MTC	20CBCA80 MTC	10CBCA90 MTC	100MTC	100FILER
Resistência à compressão (Mpa)	29,14	12,54	23,76	28,35	29,97	29,77	33,94	35,11	33,89	19,75
% em relação ao CIM	100,00	43,02	81,54	97,31	102,86	102,17	116,49	120,50	116,31	67,78

Fonte: A autora (2022)