



**Universidade Federal de Pernambuco**

**Centro Acadêmico do Agreste**

**Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil e Ambiental**

**EMERSON JOSÉ DA SILVA**

**UTILIZAÇÃO DO MÉTODO DE CONDUTIVIDADE ELÉTRICA PARA ANÁLISE  
DA POZOLANICIDADE DA CINZA DO BAGAÇO DE CANA-DE-AÇÚCAR.**

**Caruaru**

**2016**

**EMERSON JOSÉ DA SILVA**

**UTILIZAÇÃO DO MÉTODO DE CONDUTIVIDADE ELÉTRICA PARA ANÁLISE  
DA POZOLANICIDADE DA CINZA DO BAGAÇO DE CANA-DE-AÇÚCAR.**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil e Ambiental da Universidade Federal de Pernambuco – Centro Acadêmico do Agreste para obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil e Ambiental.

Área de concentração: Estruturas e Materiais.

**Orientador: D.Sc. Antônio Acacio de Melo Neto**

**Co-Orientador: D.Sc. Humberto Correia Lima Júnior**

**Caruaru**

**2016**

Catálogo na fonte:  
Bibliotecária - Simone Xavier CRB/4-1242

S586u Silva, Emerson José da.  
Utilização do método de condutividade elétrica para análise da pozolanicidade da cinza do bagaço da cana-de-açúcar. / Emerson José da Silva. - 2016.  
82f. il. ; 30 cm.

Orientador: Antônio Acácio de Melo Neto  
Coorientador: Humberto Correia Lima Júnior  
Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Pernambuco, CAA, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil e Ambiental, 2016.  
Inclui referências bibliográficas

1. Condutividade elétrica. 2. Pozolanas. 3. Bagaço de cana. 4. Reaproveitamento (Sobras, refugos, etc.). I. Melo Neto, Antônio Acácio de.(Orientador). II. Lima Júnior, Humberto Correia (Coorientador). III. Título.

620 CDD (23. ed.) UFPE (CAA 2016-033)



**UNIVERSIDADE FEDERAL DE PERNAMBUCO**  
**Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil e Ambiental**  
**Área de Concentração em Estruturas e Materiais**

A comissão examinadora da Defesa de Dissertação de Mestrado

**UTILIZAÇÃO DE MÉTODOS DE CONDUTIVIDADE ELÉTRICA PARA ANÁLISE  
DA POZOLANICIDADE EM PASTAS DE CIMENTO PORTLAND COM  
SUBSTITUIÇÃO POR CINZA DO BAGAÇO DE CANA-DE-AÇÚCAR.**

Defendida por

EMERSON JOSÉ DA SILVA

Considera o candidato APROVADO

Caruaru, 17 de fevereiro de 2016

---

D.Sc. Antônio Acacio de Melo Neto – PPGECAM / UFPE  
(Orientador – Presidente da Banca)

---

D. Sc. Erika Pinto Marinho – PPGECAM / UFPE  
(examinador interno)

---

D. Sc. Yêda Vieira Póvoas Tavares – UPE  
(examinador externo)

Ofereço a Deus, o meu auxiliador fonte de toda graça e todo bem. Dedico ainda de modo todo especial a minha mãe, Maria do Socorro da Silva, aos meus avós Paulo Manoel da Silva e Aurora Maria da Silva, e a minha noiva Gabriela Miranda, pelo amor, ensinamentos, e confiança.

## **AGRADECIMENTOS**

A Deus, pelo dom da vida concedido, Ele que é o princípio e fim de todas as coisas!  
E a virgem Maria Mãe de Deus, fiel companheira e doce intercessora!

Ao grande tesouro que Deus me concedeu, a graça de ter uma Família, pelos valores humanos transmitidos, decisivos para a formação do meu caráter e pelo amor incondicional. A minha noiva Gabriela Miranda, pela companhia amorosa, fonte de fortalecimento para a minha caminhada à realização dos meus sonhos.

Ao meu orientador, Professor Antônio Acacio de Melo Neto, pela confiança depositada e principalmente por me auxiliar na construção do conhecimento, indicando os caminhos a serem seguidos no decorrer dos estudos, sua disponibilidade e dedicação.

Ao Professor Humberto Correia de Lima Júnior, pela co-orientação e transmissão do conhecimento, tão importantes para minha formação.

Ao professor Holmer Savastano Júnior, por me acolher na FZEA/USP – Pirassununga, por toda orientação e subsídio necessário para a realização de alguns ensaios tão importantes para a conclusão deste trabalho.

Aos professores do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil e Ambiental da UFPE - CAA que estiveram presentes na minha formação acadêmica, que o Senhor os recompense.

Aos técnicos do Laboratório de Construção Civil da UFPE - CAA, Everton Rodrigues e Fabíola Franca, e do Laboratório de Construção Rural e Ambientância da FZEA/USP - Pirassununga, Diego Ferrari e Mariana Pavesi, por toda disponibilidade e apoio para a realização dos ensaios.

Aos alunos bolsistas de manutenção acadêmica e graduandos do curso de Engenharia Civil da UFPE - CAA, Sérgio Manoel e Ítalo Lucas, por toda ajuda no beneficiamento da cinza e grande contribuição nos ensaios.

Aos meus amigos, por toda a paciência, carinho e ajuda que me dedicaram todo este tempo, tornando possível prosseguir este caminho sem desanimar. Louvado seja Deus por me agradecer com vocês!

Aos companheiros de jornada: Carlos Henrique Selegin, Dannúbia Ribeiro Pires, Maria Victória Leal, Pablo Borba de Barros Góes, Marília Neves Marinho e Lawrence Francisco Costa por todo apoio, ajuda e companheirismo.

A CAPES – Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior e a PROPESQ – Pró-reitoria para assuntos de pesquisa e Pós-Graduação, pela oportunidade de ser bolsista.

A FACEPE – Fundação de Amparo à Ciência e Tecnologia de Pernambuco, pelo convênio de pesquisa com o CETENE – Centro de Tecnologia Estratégicas do Nordeste, pela bolsa de cooperação técnica.

Ao CETENE - seus funcionários e técnicos, como também por toda assistência nos ensaios realizados.

A usina fornecedora da cinza, utilizada neste trabalho.

A todos aqueles que direta ou indiretamente contribuíram para a realização deste trabalho o meu Muito Obrigado!

“Quanto mais me aprofundo na ciência, mais me  
aproximo de Deus”. (Albert Einstein).



## RESUMO

Muitos estudos acerca do aproveitamento de resíduos e sua utilização em matrizes cimentícias têm sido desenvolvidos, na busca de um destino adequado, uma vez que a construção civil é um dos maiores consumidores de materiais naturais em seus processos e produtos. As cinzas agroindustriais ocupam lugar de destaque dentre os resíduos com possibilidades de aplicação por apresentarem propriedades pozolânicas, como por exemplo, cinzas volantes, sílica ativa entre outros, contribuindo para a redução do consumo de cimento Portland e sustentabilidade da indústria de materiais cimentícios. O bagaço da cana-de-açúcar é um dos subprodutos do processo de produção da cana-de-açúcar, sendo o Brasil o maior produtor mundial. Neste trabalho foram produzidas cinzas a partir do beneficiamento por queima controlada e moagem da cinza do bagaço de cana-de-açúcar (CBCA) coletada em uma usina do estado de Pernambuco para avaliar a sua aplicação como adição mineral em matrizes de base cimentícia. A cinza coletada foi submetida a um processo prévio de secagem em estufa e peneiramento para retirada de materiais contaminantes (folhas, pedras e outros). Parte do material passante não sofreu tratamento térmico, sendo denominada CAN, o restante foi dividido em quatro frações, cada fração submetida a uma temperatura de queima: 300°C, 400°C, 500°C e 600°C, sendo denominadas CB300, CB400, CB500 e CB600, respectivamente. Após a queima, cada cinza passou por um processo de peneiramento/moagem e foi submetida a análises de fluorescência de raios X, difração de raios X, massa específica real por picnometria a gás e área superficial específica por B.E.T (*Brunauer-Emmett-Teller*). A reatividade das cinzas foi avaliada por meio de medições de condutividade elétrica em solução saturada de  $\text{Ca}(\text{OH})_2$ /cinzas e o índice de atividade com cal (IAC), foi baseado na ABNT NBR 5751 (2012). Os resultados por condutividade elétrica indicam tendência de reatividade do material estudado, quando comparado a pozolana de referência - MTC. O IAC das amostras com CBCA mostraram resultados satisfatórios apenas para as cinzas moídas por 7 horas. A moagem mostrou ser de fundamental importância para o aumento do potencial pozolânico da CBCA. A temperatura de calcinação se mostrou relevante quando da aplicação de 500°C, acima deste valor ocorreu o decréscimo dos índices de pozolanidade.

**Palavra-Chave:** Adição mineral, Cinza do bagaço da cana-de-açúcar, Pozolana, Condutividade elétrica.

## ABSTRACT

Many studies about waste recovery and your use in cement matrices have been developed on the search for a appropriate destination, since the civic construction is one of the largest consumers of natural materials in their processes and products. The agroindustrial ashes occupy prominent place among the residues with application possibilities for presenting pozzolanic properties, such as fly ash, silica fume among others, contributing for the reduction of the consumption of cement Portland and sustainability of cementitious materials industry. The bagasse of the sugarcane is one of the byproducts of the production process of sugarcane, with Brazil being the world's largest producer. In this work were produced ashes from the beneficiation by controlled burning and grinding of ash from sugarcane bagasse (CBCA) collected in a mill of Pernambuco to evaluate your application as mineral addition in cement-based matrices. The collected ash was submitted to a previous drying process in a kiln and sieving for removing contaminant material (leaves, stones and other) part of the passing material did not suffer thermal treatment, called CAN, the remainder was divided into four portions, each portion submitted to a firing temperature: 300 ° C, 400 ° C, 500 ° C and 600 ° C, called CB300, CB400, CB500 and CB600, respectively. After burning, each ash passed through a process of sieving/milling and was submitted to X-ray fluorescence analysis, X-ray diffraction, real specific mass by gas pycnometry and specific surface area by BET (Brunauer-Emmett-Teller). The reactivity of the ash was evaluated by means of electrical conductivity measurements in saturated solution of  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  / ashes. The activity index with lime (AIL), based on the ABNT NBR 5751 (2012). The results by electrical conductivity indicates tendency of reactivity of the studied material, when compared to the pozzolan of reference - MTC. The AIL of de samples with CBCA showed satisfactory results just for milled ashes for 7 hours. The milling showed to be of fundamental importance for improve the pozzolanic potential of the CBCA. The temperature showed to be relevant whe the application of 500°C, above this value occurred decrease of pozzolanicity index.

**Keywords: Mineral addition, sugar cane bagasse ashes, pozzolan, electrical conductivity.**

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1 – Evolução da produção da cana-de-açúcar no Brasil para o período de 2004 a 2014. ....	18
Figura 2.1 – Representação esquemático da microestrutura de uma pasta de cimento hidratada, sem e com dição pozolânica, respectivamente. ....	24
Figura 2.2 – Esquema gráfico que representa a zona de transição entre agregado graúdo e a pasta hidratada de cimento, sem e com adição pozolânica, respectivamente.....	25
Figura 2.3 - Partes constituintes da cana-de-açúcar. ....	31
Figura 3.1 - Fluxograma do Programa Experimental. ....	37
Figura 3.2 - Bagaço da cana-de-açúcar antes da queima.....	39
Figura 3.3 - Processo de queima do bagaço da cana-de-açúcar em caldeira.....	39
Figura 3.4 - Fluxograma do Programa Experimental do tratamento térmico.....	44
Figura 3.5 - Fluxograma do Programa Experimental do tratamento de peneiramento / moagem .....	44
Figura 3.6 – Procedimento de queima das CBCA em mufla. ....	45
Figura 3.7 – Adaptação adotada para o processo de peneiramento das CBCA.....	46
Figura 3.8 - Procedimento do tratamento de peneiramento.....	47
Figura 3.9 – Moinho de bolas e processo de moagem das CBCA. ....	48
Figura 3.10 - Esquema para a caracterização das amostras.....	50
Figura 3.11 – Ensaio de atividade pozolânica pelo método de condutividade elétrica do sistema CH/cinza. ....	53
Figura 4.1 - Área Superficial BET das CBCA. ....	57
Figura 4.2 – Finura Blaine das CBCA.....	57
Figura 4.3 - Massa específica das CBCA, agrupadas por tratamento de peneiramento / moagem. ....	59
Figura 4.4 – Difração de raios X da CBCA sem calcinação. ....	60
Figura 4.5 - Difração de raios X da CBCA calcinadas a 300°C.....	61
Figura 4.6 - Difração de raios X da CBCA calcinadas a 400°C.....	61
Figura 4.7 - Difração de raios X da CBCA calcinadas a 500°C.....	62
Figura 4.8 - Difração de raios X da CBCA calcinadas a 600°C.....	62
Figura 4.9 – Condutividade elétrica versus tempo de CH / MTC.....	63

Figura 4.10 - Condutividade elétrica versus tempo de CH / CAN.....	64
Figura 4.11 - Condutividade elétrica versus tempo de CH / CB300.....	64
Figura 4.12 - Condutividade elétrica versus tempo de CH / CB400.....	65
Figura 4.13 - Condutividade elétrica versus tempo de CH / CB500.....	65
Figura 4.14 - Condutividade elétrica versus tempo de CH / CB600.....	66
Figura 4.15 - Condutividade elétrica versus tempo de CH / #200.....	66
Figura 4.16 - Condutividade elétrica versus tempo de CH / #400.....	67
Figura 4.17 - Condutividade elétrica versus tempo de CH / P400.....	67
Figura 4.18 - Condutividade elétrica versus tempo de CH / M7H.....	68
Figura 4.19 – Variação da Condutividade elétrica entre 120 e 85000 s das CBCA e do MTC. .....	69
Figura 4.20 – Resistência à compressão em (Mpa) das CBCA e do MTC em função do tratamento de peneiramento / moagem.....	72
Figura 4.21 - Resistência à compressão em (Mpa) das CBCA e do MTC em função do tratamento de Calcinação.....	73

## LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 - Óxidos compostos do clínquer e suas abreviações.....	26
Tabela 2.2 - Principais compostos do cimento Portland e suas características .....	27
Tabela 3.1 - Composição química (% óxidos) e perda ao fogo do metacaulim (MTC).....	38
Tabela 3.2 - Composição química (% óxidos) e perda ao fogo da CBCA.....	40
Tabela 3.3 - Análise química da cal hidratada CH-I. ....	41
Tabela 3.4 - Características físicas da areia quartzosa. ....	41
Tabela 3.5 - Distribuição granulométrica da areia quartzosa. ....	42
Tabela 3.6 - Propriedades e Características do Aditivo plastificante quartzolite.....	42
Tabela 3.7 – Relação de bolas de alumina, com diâmetros, massas e volumes utilizadas na moagem das CBCA. ....	48
Tabela 3.8 - Quadro resumo das amostras a produzidas e suas respectivas denominações. ....	49
Tabela 4.1 - Quadro resumo das propriedades físicas da CBCA submetida aos tratamentos e dos materiais utilizados na pesquisa.....	56
Tabela 4.2 – Massa específica real das CBCA, MTC e CH-I. ....	59
Tabela 4.3 – Valores de condutividade elétrica dos sistemas CH/cinza para os períodos de avaliação de 120 s, 10000 s, 85000 s e variação da condutividade total das CBCA.....	68
Tabela 4.4 – Avaliação da atividade pozolânica por medida de condutividade elétrica. ....	70
Tabela 4.5 - Quadro resumo das propriedades das argamassas de cal hidratada com metacaulim e cinza do bagaço de cana-de-açúcar. Moldagem de 3 corpos-de-prova.....	71

## LISTA DE EQUAÇÕES

Equação 2.1 – Reação Pozolânica .....	23
Equação 2.2 - Reação de hidratação da Alita .....	28
Equação 2.3 - Reação de hidratação da Belita .....	28
Equação 2.4 - Hidratação dos aluminatos .....	28

## LISTA DE ABREVIATURA E SIGLAS

- AFm – Monossulfoaluminato de cálcio hidratado
- AFt – Sulfoaluminato de cálcio (etringita)
- C<sub>2</sub>S – Belita - Silicato dicálcico
- C<sub>3</sub>A – Aluminato - Aluminato tricálcico
- C<sub>3</sub>S – Alita - Silicato tricálcico
- C<sub>4</sub>AF – Ferrita - Ferroaluminato tetracálcico
- CAH – Aluminato de cálcio hidratado
- CAN - Cinza do bagaço da cana-de-açúcar “in natura”
- CASH – Silicato aluminato de cálcio hidratado
- CB300 - Cinza do bagaço da cana-de-açúcar calcinada à 300°C
- CB400 - Cinza do bagaço da cana-de-açúcar calcinada à 400°C
- CB500 - Cinza do bagaço da cana-de-açúcar calcinada à 500°C
- CB600 - Cinza do bagaço da cana-de-açúcar calcinada à 600°C
- CBCA – Cinza do bagaço da cana-de-açúcar
- CCA – Cinza de casca de arroz
- CH – Hidróxido de cálcio, Portlandita
- CH-I – Cal Hidratado do tipo 1
- CP – Cimento Portland
- CSH – Silicato de cálcio hidratado
- IAC – Índice de atividade com cal
- M7H – Material moído por 7 (sete) horas no moinho de bolas
- MTC – metacaulim de referência
- P400 – material passante na peneira N° 400 (0,038 mm)
- RL – Resfriamento lento

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO .....</b>	<b>17</b>
1.1	Objetivo Geral.....	19
1.2	Objetivos Específicos .....	19
1.3	Organização da dissertação .....	20
<b>2</b>	<b>REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....</b>	<b>21</b>
2.1	Materiais Pozolânicos .....	21
2.1.1	As reações pozolânicas .....	22
2.1.2	As reações pozolânicas no sistema de hidratação do cimento Portland .....	25
2.2	A cinza do bagaço da cana-de-açúcar como adição pozolânica.....	31
2.3	Métodos de avaliação da atividade pozolânica.....	33
<b>3</b>	<b>MATERIAIS E MÉTODOS.....</b>	<b>36</b>
3.1	Programa Experimental.....	36
3.2	Materiais .....	38
3.2.1	Tipos de pozolanas: CBCA e pozolana de referência (MTC).....	38
3.2.2	Hidróxido de Cálcio .....	40
3.2.3	Cal Hidratada.....	40
3.2.4	Areia .....	41
3.2.5	Aditivo.....	42
3.3	Planejamento Experimental.....	43
3.3.1	Calcinação da CBCA.....	45
3.3.2	Peneiramento / moagem da CBCA.....	46
3.4	Procedimentos de Ensaio.....	49
3.4.1	Caracterização Química.....	50
3.4.1.1	Fluorescência de Raios – X (FRX) e Perda ao fogo .....	50
3.4.1.2	DRX .....	50
3.4.2	Caracterização Física.....	51
3.4.2.1	Área específica BET .....	51
3.4.2.2	Área específica Blaine .....	51
3.4.2.3	Massa específica real .....	52
3.4.3	Avaliação da pozolânicidade da CBCA .....	52



3.4.3.1	Medida de Condutividade elétrica .....	52
3.4.3.2	Índice de Atividade Pozolânica - ABNT NBR 5751 (2012) .....	54
<b>4</b>	<b>RESULTADOS E DISCUSSÃO .....</b>	<b>56</b>
<b>4.1</b>	<b>Caracterizações físicas e químicas.....</b>	<b>56</b>
4.1.1	Área superficial das CBCA .....	56
4.1.2	Massa específica real .....	58
4.1.3	Análise de difração de raios-X nas cinzas .....	60
<b>4.2</b>	<b>Avaliação da atividade pozolânica das CBCA por condutividade elétrica .....</b>	<b>63</b>
<b>4.3</b>	<b>ABNT NBR 5751 (2012) .....</b>	<b>71</b>
<b>5</b>	<b>CONCLUSÕES .....</b>	<b>75</b>
<b>6</b>	<b>SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....</b>	<b>77</b>
	<b>REFERÊNCIAS .....</b>	<b>78</b>

## UTILIZAÇÃO DO MÉTODO DE CONDUTIVIDADE ELÉTRICA PARA ANÁLISE DA POZOLANICIDADE DA CINZA DO BAGAÇO DE CANA-DE-AÇÚCAR.

### 1 INTRODUÇÃO

É crescente a atividade da construção civil no Brasil. Segundo o Sindicato Nacional da Indústria do Cimento (SNIC, 2014), o consumo aparente per capita 2013 de Cimento Portland foi de 353 kg/habitante. No processo de produção do cimento Portland são gerados diversos impactos ambientais e sociais existindo, portanto, uma preocupação desse setor, na busca de tecnologias modernas que venham a minimizar ou mesmo evitar parte da ação desses impactos. Uma das formas de minimização desses impactos na indústria de cimento no Brasil hoje se dá em possuir um parque industrial moderno, apresentando diminuições da emissão do CO<sub>2</sub> associada ao uso de adições minerais e de biomassa na geração de energia (RODRIGUES, 2012).

Muitos estudos vêm crescendo na análise da utilização de resíduos na construção civil, com maior enfoque: na substituição parcial do cimento Portland ou mesmo como substituição parcial do agregado miúdo. A utilização destes materiais objetiva um destino adequado aos mesmos, bem como em contribuir no desempenho do material quando o resíduo é incorporado na matriz cimentícia (VASCONCELOS, 2013).

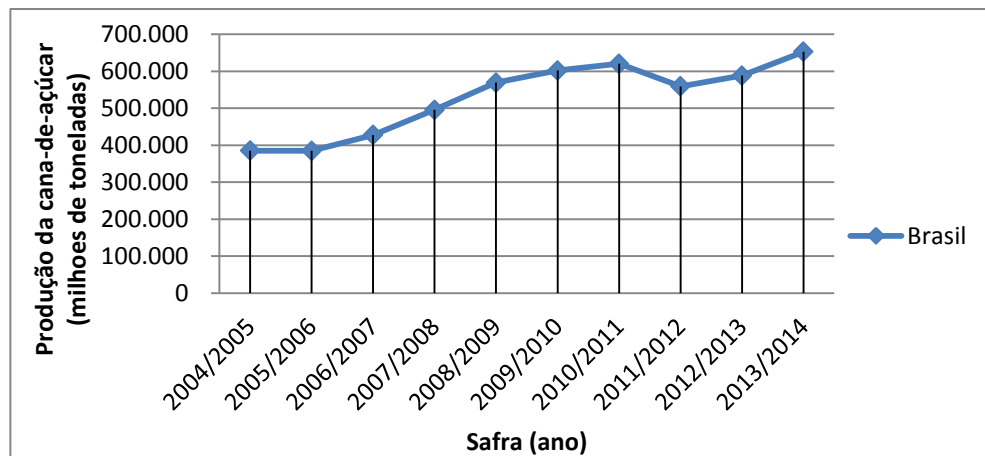
Segundo ABNT NBR 12653 (1992), os materiais pozolânicos são classificados como materiais silicosos ou silicoaluminosos que, por si só, possuem pouca ou nenhuma propriedade cimentante, mas, quando finamente divididos e na presença de umidade, reagem quimicamente com o hidróxido de cálcio, à temperatura ambiente para formar compostos com propriedades cimentantes.

O emprego de materiais pozolânicos, como por exemplo, cinzas volantes, sílica ativa, entre outros, promove uma redução substancial do consumo de cimento Portland, obtendo por consequência uma maior durabilidade de concretos e argamassas. Assim, a utilização de resíduos em compostos cuja matriz é cimentícia contribui para a sustentabilidade da indústria de materiais cimentícios (RODRIGUES, 2012).

Segundo a Única (2015) o Brasil é o maior produtor mundial de cana-de-açúcar, açúcar e álcool, além de ser o maior exportador mundial de açúcar. O crescente consumo de açúcar dos países emergentes, bem como, o aumento da frota de carros com a tecnologia flex,

notoriamente no Brasil e Estados Unidos, estimula o contínuo crescimento da produção nacional de açúcar e etanol. No acumulado da safra de 2013/2014, a produção de açúcar cresceu 10,96%, totalizando 64,478 milhões de toneladas em relação a safra de 2012/2013 (ÚNICA, 2015). Os estados brasileiros com maior produção de cana-de-açúcar são: Alagoas, Minas Gerais, São Paulo, Goiás, Pernambuco e Paraná. A Figura 1.1 e ilustra a evolução da produção da cana-de-açúcar no período de 2004/2014 no Brasil.

**Figura 1.1 – Evolução da produção da cana-de-açúcar no Brasil para o período de 2004 a 2014.**



Fonte: Única (2015).

Na produção do açúcar e do álcool o material resultante é o bagaço da cana-de-açúcar. Esse bagaço, com o passar dos anos, foi sendo valorizado na produção de energia através da sua queima gerando vapor. Dantas Filho (2009) mostrou que uma usina com produção em torno de três milhões de toneladas de cana moída gerou em torno de 740 mil toneladas de bagaço, e 29 MW de energia pela queima em caldeiras. O resíduo produzido dessa geração de energia é a cinza do bagaço da cana-de-açúcar (CBCA).

Segundo Romero (2014), observou-se que, ao moer uma tonelada de cana-de-açúcar há uma geração de aproximadamente 250 kg de CBCA. Em 2011 o Brasil produziu cerca de 3,7 milhões de toneladas de CBCA (ROMERO, 2014). Segundo Vasconcelos (2013), com base na abundância desse material, bem como o seu potencial para o emprego na construção civil, duas linhas de pesquisa propõem e defendem sua reutilização na produção de concretos e argamassas: a incorporação da cinza ao cimento Portland como adição pozolânica (o que permite a redução do consumo de clínquer pela indústria cimentícia como também um ganho na melhoria da durabilidade dos concretos e argamassas) e a utilização CBCA como agregado miúdo (substituição parcial a areia na confecção de pastas de cimento).

Quanto da existência da pozolanicidade na CBCA os autores Cordeiro (2006); Paula (2006); Cordeiro (2009); Nunes (2009); Zardo et al., (2004) relatam que ainda não é definitiva, embora em sua pesquisa Freitas (2005) aponta a atividade pozolânica de amostras de cinza do bagaço de cana-de-açúcar, já Zardo et al., (2004) revela o contrário mostrando que esse tipo de material atua como *filler*. Portanto, todos os pesquisadores citados apresentam aspectos benéficos do uso da cinza do bagaço de cana-de-açúcar, quer seja pelo o efeito *filler* quer seja pelo o efeito pozolânico.

No presente estudo, será focada a utilização do resíduo da cinza do bagaço da cana-de-açúcar (CBCA) como substituição parcial do cimento Portland. Para isto, o resíduo deverá apresentar características que o classifiquem como um material pozolânico, sendo avaliado pelo método de condutividade elétrica.

A aplicação do método de condutividade elétrica tem sido amplamente observada por muitos autores, uma vez que se trata de um método útil não só para monitorar a hidratação inicial de aglomerantes, mas também como um avaliador tanto da atividade pozolânica como da reação álcali-agregado, existindo basicamente dois métodos: Um usa soluções ativadoras e o outro uso ativando pó sólido (TASHIRO et al, 1994).

## **1.1 Objetivo Geral**

O objetivo geral deste trabalho é avaliar o potencial pozolânico da cinza do bagaço de cana-de-açúcar do por meio da utilização do método de condutividade elétrica.

## **1.2 Objetivos Específicos**

- Analisar o efeito do grau de moagem das cinzas nas propriedades físicas, químicas, de microestrutura e de atividade pozolânica.
- Analisar o efeito do tratamento térmico aplicado nas propriedades físicas, químicas, de microestrutura e de atividade pozolânica.
- Caracterizar as cinzas por meio de análises químicas, físicas e de microestrutura.

- Analisar a atividade pozolânica da cinza do bagaço da cana-de-açúcar (CBCA) em relação ao material pozolânico de referência (metacaulim - MTC).
- Comparar os resultados com a ANBT NBR 5751 (2012), de modo a verificar a coerência dos efeitos dos tratamentos aplicados.

### **1.3 Organização da dissertação**

No primeiro capítulo, apresenta-se a introdução, os objetivos geral e específico e a organização do trabalho.

O segundo capítulo trata da revisão bibliográfica acerca dos assuntos abordados neste trabalho, tais como: os materiais pozolânicos, as reações pozolânicas no sistema de hidratação do cimento Portland, a cinza do bagaço de cana-de-açúcar como adição pozolânica e a avaliação da atividade pozolânica por diversas técnicas.

No terceiro capítulo descreve-se o programa experimental, todos os materiais utilizados e metodologia adotada para a queima, peneiramento/moagem da CBCA, as caracterizações físicas e químicas, avaliação pozolânica pelo ensaio de condutividade elétrica e avaliação da atividade com cal pela ABNT NBR 5751 (2012).

No quarto capítulo, são apresentados os resultados e as discussões, com a análise da influência dos tratamentos aplicados à CBCA e o comparativo com a pozolana de referência.

As conclusões estão dispostas no quinto capítulo desta dissertação.

No sexto capítulo são apresentadas as sugestões para trabalhos futuros.

No final do trabalho, encontram-se as referências bibliográficas em ordem alfabética.

## 2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

### 2.1 Materiais Pozolânicos

O termo pozolana era atribuído como materiais naturais de origem vulcânica que reagem com a cal em presença de água, à temperatura ambiente. Atualmente, considera-se pozolânico todo material inorgânico, natural ou artificial, silicoso ou alumino-silicoso que por si só não apresenta atividade aglomerante. Entretanto, quando finamente moído e em presença de água, reage com o hidróxido de cálcio (ABNT NBR 12653, 1992; CORDEIRO, 2006).

Segundo a ABNT NBR 12653 (1992), as pozolanas são classificadas em três grupos: classe N, classe C e classe E. A classe N é composta por pozolanas naturais, de origem vulcânica, e por pozolanas artificiais, que são os subprodutos industriais provenientes de tratamento térmico; a classe C é composta por cinzas volantes, que são resíduos finamente moídos que resultam da queima de carvão mineral em termelétricas; e a classe E, composta por outras pozolanas, tais como: cinza volante e cinzas de resíduos vegetais.

Segundo Cordeiro (2006), o emprego de pozolanas naturais como material cimentício é datado de há cerca de 2000 anos. Os romanos utilizavam em suas construções um material denominado “*pulvis putelonis*”, cinza de origem vulcânica proveniente da localidade chamada de Pozzuoli situada na Baía de Nápoles (Itália). Posteriormente, este material seria denominado pozolana, sendo este amplamente empregado em várias edificações do Império Romano em misturas com cal e água, onde muitas dessas obras encontram-se intactas e em uso até os dias atuais, revelando a durabilidade dos compostos hidráulicos compostos por pozolanas (MASSAZZA, 1998).

As adições pozolânicas podem entrar na mistura da argamassa ou do concreto no lugar de parte do agregado miúdo ou como componente do cimento Portland, substituindo até 50% do clínquer (VASCONCELOS, 2013).

### 2.1.1 As reações pozolânicas

A reação pozolânica é a reação entre a pozolana e o hidróxido de cálcio. Compostos quimicamente ativos do aditivo mineral podem reagir com o hidróxido de cálcio, produzidos pela hidratação dos silicatos do cimento Portland, para formar novos produtos hidratados (MEHTA e MONTEIRO, 2008; CORDEIRO, 2006). O CSH é o principal produto de hidratação do cimento Portland, e, conseqüentemente o resultado dessa reação (RODRIGUES, 2012).

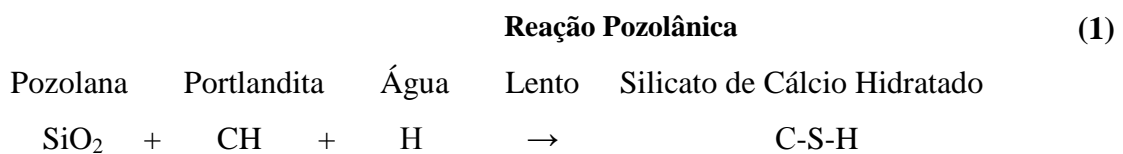
A importância técnica da produção de cimentos pozolânicos se fundamenta em três aspectos da reação pozolânica: a reação é lenta (a taxa de liberação de calor é lenta e o tempo de trabalhabilidade da matriz aumenta); a reação irá consumir hidróxido de cálcio e não produzi-lo, melhorando, assim, a durabilidade da pasta endurecida quando em contato com meios ácidos; os produtos de reação que são formados são bastante eficientes no preenchimento dos espaços capilares grandes, melhorando a resistência e a impermeabilidade da matriz (NEVILLE, 1982; MEHTA e MONTEIRO, 1994).

Em presença de água, a reação de CH e pozolana varia de acordo com os seguintes fatores: natureza das fases ativas da pozolana ( $\text{SiO}_2$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ), conteúdo de pozolana na mistura, teor de  $\text{SiO}_2$  ativa e razão CH-pozolana na mistura. A taxa de reação é função da área específica da pozolana, da relação sólido-água na mistura e da temperatura (CORDEIRO, 2006). O aumento da temperatura na cura acelera a reação de hidratação.

A reação pozolânica é uma reação do tipo ácido-base, onde os óxidos (ácidos) da pozolana reagem com a cal (básica) presente na portlandita. Entretanto é importante ressaltar que é necessário que os óxidos de sílica e alumina estejam no estado amorfo, ou seja, instáveis para serem vulneráveis ao hidróxido de cálcio (MEHTA, 2008). O clínquer e a pozolana reagem em diferentes estágios da hidratação da pasta de cimento, sendo a reação pozolânica mais lenta já que esta só se inicia entre 7 e 15 dias após o início da hidratação do clínquer. Desse modo, o cimento com adição de pozolana possui menor calor de hidratação e desenvolve resistência mecânica mais lentamente (MASSAZZA, 1998).

Segundo Mehta e Monteiro (2008), o calor de hidratação total produzido pelas reações pozolânicas envolvendo a adição mineral é considerado como a metade do calor médio produzido pela hidratação do cimento Portland.

Segundo Vasconcelos (2013) uma das principais vantagens da utilização de adição pozolânica em concretos é o aumento de sua durabilidade. A reduzida porosidade da pasta de cimento com adição dificulta a entrada de agentes agressivos ao concreto e a sua armadura como gás carbono, íons de cloreto, soluções ácidas e sulfato. A pozolana também inibe a reação álcali-agregado que ocorre entre a Portlandita, presente na pasta de cimento, e o agregado graúdo, quando este possui fases mineralógicas reativas (VASCONCELOS, 2013). Esta reação gera um gel expansivo no interior do concreto que leva à fissuração do mesmo. A reação pozolânica é ilustrada pela equação 1.



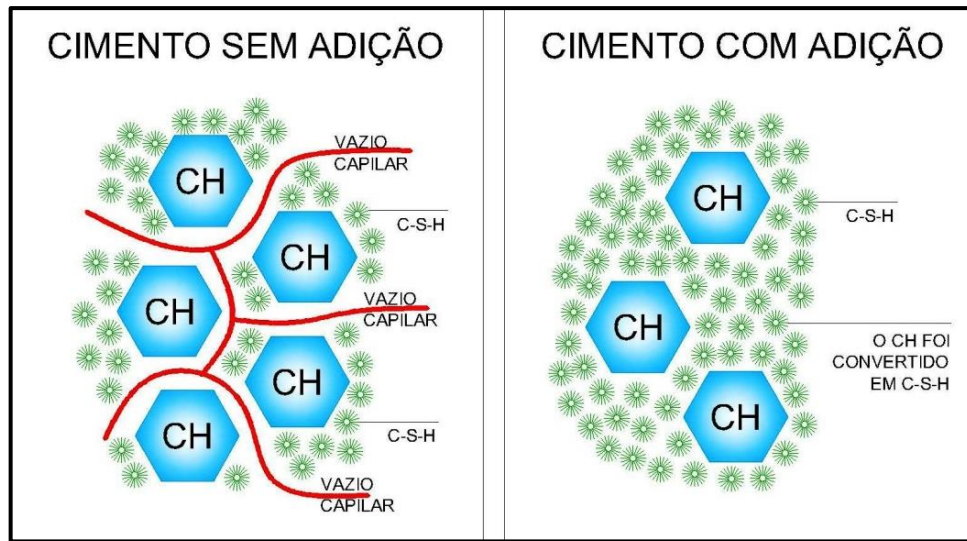
Na reação pozolânica, como visto no esquema acima, os cristais de hidróxido de cálcio existentes na pasta de cimento hidratada são consumidos, transformando-se no gel de C-S-H. Além de transformações químicas, a pozolana também causa efeitos físicos na pasta de cimento. A ação simultânea dos fenômenos físicos e químicos causados pela adição pozolânica deixam a pasta de cimento menos porosa e mais resistente em idades tardias.

Segundo Isaia (2011), a adição pozolânica promove efeitos na pasta de cimento (físico e químico) - o efeito microfíler, ou seja, o refinamento da estrutura dos poros e do tamanho dos grãos dos produtos hidratados do cimento e alteração da microestrutura e da zona de transição em concretos. O efeito microfíler ocorre quando as micropartículas da adição preenchem os vazios entre as partículas de cimento e areia deixando a mistura mais densa e com melhor empacotamento de suas partículas.

Além da reação pozolânica funcionar como ponto de nucleação e barreira para o crescimento de grandes cristais, a pozolana converte o CH em C-S-H, essa reação química é o principal diferencial entre as pozolanas e as demais adições minerais. As partículas de C-S-H são menores, sendo capazes de ocupar vazios capilares, e possuem maior área específica, proporcionando a pasta de cimento resistência mecânica (ISAIA, 2011). A Figura 3.1 ilustra a microestrutura de uma pasta de cimento hidratada sem e com adição de pozolana.



**Figura 2.1 – Representação esquemático da microestrutura de uma pasta de cimento hidratada, sem e com dição pozolânica, respectivamente.**

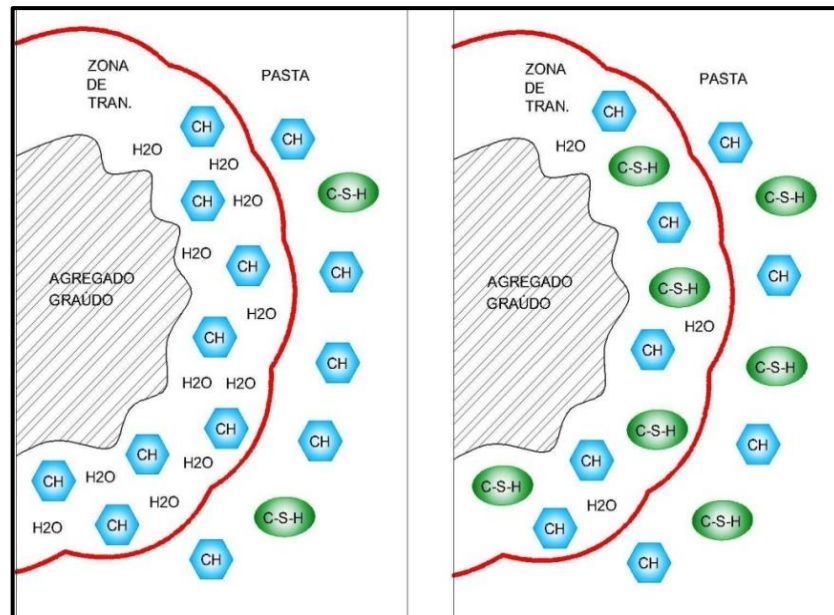


Fonte: Vasconcelos (2013).

Segundo Vasconcelos (2013), outro efeito químico provocado pela reação pozolânica é a modificação da microestrutura da zona de transição, beneficiando estruturas de concreto. Na zona de transição existe um acúmulo de água livre, que não está quimicamente combinada, rente aos agregados graúdos do concreto. Dessa maneira, a água enfraquece a zona de transição entre a pasta e o agregado, sendo normalmente a região onde o concreto fratura. Assim, a adição pozolânica reduz esse acúmulo de água livre e transforma o CH em excesso na zona de transição no gel de C-S-H, aumentando a resistência mecânica. A Figura 3.2 ilustra o esquema gráfico da zona de transição entre o agregado graúdo e a pasta hidratada de cimento, com e sem adição pozolânica, respectivamente.

Tem-se como uma das principais vantagens da utilização de adição pozolânica em concretos o aumento de sua durabilidade, devido à reduzida porosidade da pasta de cimento com adição, o que dificulta a entrada de agentes agressivos ao concreto, e a sua armadura como gás carbono, íons de cloreto, soluções ácidas e sulfato. Também é inibida pela adição pozolânica a reação álcali-agregado, ocorrida entre a Portlandita, presente na pasta de cimento, e o agregado graúdo, quando o mesmo possui fases mineralógicas reativas. Dessa reação é gerado um gel expansivo no interior do concreto, o que acarreta a fissuração do mesmo. Por meio da adição pozolânica, as moléculas de CH são consumidas, e, por não haver álcalis livres no sistema, a reação álcali-agregado é impedida (ISAIA, 2011; VASCONSELOS, 2013).

**Figura 2.2 – Esquema gráfico que representa a zona de transição entre agregado graúdo e a pasta hidratada de cimento, sem e com adição pozolânica, respectivamente.**



Fonte: Vasconcelos (2013).

A utilização de pozolanas em matrizes cimentícias contribui para o desenvolvimento da resistência mecânica como resultado da combinação de efeitos físicos e químicos. Os efeitos químicos estão relacionados com a hidratação normal dos compostos do cimento Portland e da água, e a reação pozolânica do material, do hidróxido de cálcio e água. Por outro lado, os efeitos mecânicos estão associados aos efeitos de empacotamento ocorrente nas misturas e depende do tamanho das partículas da pozolana (SATA et al, 2012).

### 2.1.2 As reações pozolânicas no sistema de hidratação do cimento Portland

Cimentos são definidos como substâncias ligantes, capazes de unir fragmentos ou massa de materiais sólidos, em um corpo compacto. Dentre os ligantes, o cimento Portland (CP), é o aglomerante hidráulico utilizado na construção civil, importante para o desempenho, qualidade e durabilidade do concreto (KIHARA e CENTURIONE, 2005).

Segundo Mehta e Monteiro (2008), o cimento Portland é principalmente constituído de material calcário (rocha calcária ou gesso), e também por alumina e sílica encontrados em argilas e xistos. É contido nas argilas a alumina ( $Al_2O_3$ ) e frequentemente os óxidos de ferro

(Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>). Além de álcalis, a presença desses compostos juntamente com o MgO, no processo de mistura de matérias primas ocasiona um efeito mineralizante na formação de silicatos de cálcio. Quando as quantidades de Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> não são suficientes nas matérias primas principais, estes são incorporados à mistura por adição (bauxita e o minério de ferro) tida como materiais secundários.

A partir da queima e moagem desses materiais e posterior queima em forno rotativo a 1450 °C origina-se um material em forma de pelotas, denominado clínquer. O clínquer é resfriado e moído com 5% de gipsita, colocada para controlar o tempo de pega e regular o início das reações de hidratação, até atingir uma granulometria com partículas inferiores a 75µm. A composição química do clínquer geralmente apresenta 67% de CaO, 22% de SiO<sub>2</sub>, 5% de Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, 3% de Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> e 3% de outros componentes (TAYLOR, 1997).

O cimento Portland é composto por várias formas de cálcio, sendo os resultados de suas análises químicas expresso em termos de óxidos dos elementos presentes. Os compostos presentes no clínquer do cimento Portland são comumente expressos usando-se algumas abreviações (MEHTA e MONTEIRO, 2008). Tais abreviações, bem como os principais compostos do cimento Portland e suas características são apresentadas na Tabela 3.1 e 3.2. respectivamente.

**Tabela 2.1 - Óxidos compostos do clínquer e suas abreviações**

Óxido	Abreviação	Compostos	Abreviação
CaO	C	3CaO . SiO <sub>2</sub>	C <sub>3</sub> S
SiO <sub>2</sub>	S	2CaO . SiO <sub>2</sub>	C <sub>2</sub> S
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	A	3CaO . Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	C <sub>3</sub> A
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	F	4CaO . Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> . Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	C <sub>4</sub> AF
MgO	M	4CaO . 3 Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> . SO <sub>3</sub>	C <sub>4</sub> A <sub>3</sub> F
SO <sub>3</sub>	Ŝ	3CaO . 2 SiO <sub>2</sub> . 3 H <sub>2</sub> O	C <sub>3</sub> S <sub>2</sub> H <sub>3</sub>
H <sub>2</sub> O	H	CaSO <sub>4</sub> . 2H <sub>2</sub> O	CSH <sub>2</sub>

fonte: Mehta e Monteiro (2008)

Tabela 2.2 - Principais compostos do cimento Portland e suas características

<b>Composição aproximada</b>		$3\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$	$\beta 2\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$	$3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$	$4\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{Fe}_2\text{O}_3$
<b>Fórmula abreviada</b>		$\text{C}_3\text{S}$	$\beta\text{C}_2\text{S}$	$\text{C}_3\text{A}$	$\text{C}_4\text{AF}$
<b>Nome comum</b>		Alita	Belita	-	Fase ferrita, $\text{F}_{\text{ss}}$
<b>Impurezas principais</b>		$\text{MgO}$ , $\text{Al}_2\text{O}_3$ , $\text{Fe}_2\text{O}_3$	$\text{MgO}$ , $\text{Al}_2\text{O}_3$ , $\text{Fe}_2\text{O}_3$	$\text{SiO}_2$ , $\text{MgO}$ , Alcalis	$\text{SiO}_2$ , $\text{MgO}$
<b>Formas cristalinas comuns</b>		Monoclínica	Monoclínica	Cúbica, Ortorrômbica	Ortorrômbica
<b>Proporção de compostos presentes (%)</b>		35-65	10-40	0-15	5-15
<b>Contribuição para resistência:</b>	<b>Nas primeiras idades</b>	Boa	Pequena	Boa	Boa
	<b>Nas últimas idades</b>	Boa	Excelente	Média	Média
<b>Calor de hidratação</b>		Médio	Baixo	Alto	Médio
<b>Típico (cal/g)</b>		120	60	320	100

fonte: Mehta & Monteiro (2008)

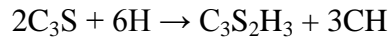
Segundo Taylor (1997), a capacidade aglomerante do cimento vem do processo de hidratação do clínquer, ou seja, de sua reação química com a água para formar compostos mais estáveis com características de pega e endurecimento. O clínquer é formado basicamente por Silicatos e Aluminatos, além de alguns óxidos em menor proporção. Por convenção, os Aluminatos presentes no clínquer são denominados de Alumina ( $\text{C}_3\text{A}$ ) e Ferrita ( $\text{C}_4\text{AF}$ ) e, conjuntamente, correspondem 10% à 25% do clínquer em volume.

Os constituintes fundamentais do cimento Portland são: a cal ( $\text{CaO}$ ), a sílica ( $\text{SiO}_2$ ), a alumina ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ), o óxido de ferro ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ), uma certa quantidade de magnésio ( $\text{MgO}$ ) e ainda uma pequena porcentagem de sulfato, que tem sua adição após a calcinação com o objetivo de retardar o tempo de pega do produto, também outros componentes como: óxido de sódio ( $\text{Na}_2\text{O}$ ), óxido de potássio ( $\text{K}_2\text{O}$ ), óxido de titânio ( $\text{TiO}_2$ ), além de outras substâncias de menor importância fazem parte da constituição do CP, porém presentes em menores quantidades (TAYLOR, 1997).

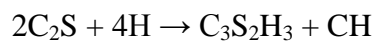
A hidratação dos silicatos ( $\text{C}_3\text{S}$  e  $\text{C}_2\text{S}$ ) no cimento Portland forma como principais produtos um gel denominado de silicato de cálcio hidratado (CSH), cristais de hidróxido de cálcio ou portlandita (CH), etringita (AFt), aluminatos de cálcio hidratados (CAH) e

monossulfoaluminato de cálcio hidratado (AFm). O  $C_3S$  é responsável pela resistência mecânica inicial na pasta em estado endurecido, enquanto que o  $C_2S$  é responsável pelo aumento da resistência em idades avançadas (TAYLOR, 1997). As reações de hidratação da alita e belita são descritas por meio das equações 2 e 3, respectivamente.

**Reação de hidratação da Alita** (2)

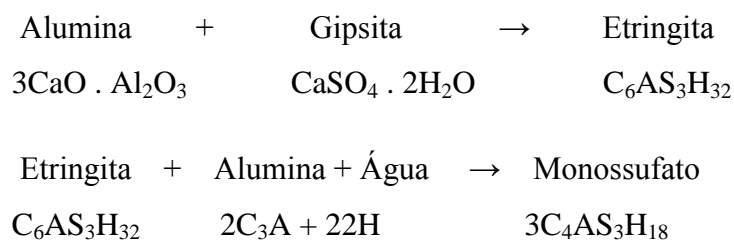


**Reação de hidratação da Belita** (3)



A hidratação dos aluminatos se dá de forma rápida, provocando o enrijecimento da pasta de cimento e, perdendo assim sua mobilidade. Para retardar a hidratação dos aluminatos e, prolongar o tempo de pega da pasta de cimento, se adiciona ao cimento Portland uma pequena quantidade de Gipsita ( $CaSO_4$ ). A reação química entre a Alumina, a Gipsita e a água se dá nas primeiras 24h, formando cristais de Etringita ( $C_6AS_3H_{32}$ ). Parte da Etringita é posteriormente convertida em Monossulfatos ( $C_4ASH_{18}$ ), estágio final da hidratação dos Aluminatos (TAYLOR, 1997). A seguir, é apresentada na equação 3.3 a hidratação dos aluminatos.

**Equação 2.4 - Hidratação dos aluminatos** (4)



Segundo Taylor (1997), o C-S-H é um gel amorfo de silicato de cálcio hidratado e tem uma estrutura em camadas com uma elevada área superficial, de acordo com o modelo de Powers-Brunauer. É o composto mais abundante na pasta de cimento compondo de 50 a 60% de seu volume. Os cristais de C-S-H tem a tendência de se aglomerarem, sendo estes os principais elementos de ligação da pasta de cimento, uma vez que, estabelecem entre si ligações que asseguram a união das fases sólidas e determinam a sua coesão e adesão. O hidróxido de cálcio, chamada de portlandita, forma grandes cristais em estrutura hexagonal

que possuem reduzida área superficial. Este composto constitui 20 a 25% do volume de sólidos na pasta de cimento hidratada. O CH também contribui com a coesão e adesão das partículas sólidas da pasta de cimento, porém de forma menos ativa que o C-S-H (TAYLOR, 1997).

Segundo Mehta e Monteiro (2008), a resistência mecânica da pasta de cimento no estado endurecido se deve principalmente ao C-S-H, de forma que, a resistência final de argamassas e concretos produzidos com cimento com altos teores de Belita é maior.

Como visto, o cimento Portland é indispensável na construção civil, uma vez que o mesmo é a principal matéria prima utilizada na produção de concretos e argamassas, um material seco, pulverulento, que após ser misturado com água adquire propriedades aglomerantes, capaz de unir materiais inertes como a areia e a brita. Passando por um período denominado de cura, a pasta de cimento se torna rígida e ganha resistência mecânica (VASCONCELOS, 2013).

A partir da década de 1950, dá-se início ao uso de cimentos com adição ganhando grande impulso na década de 1990 e, atualmente, quase que 100% dos cimentos comercializados no Brasil possuem adição (ISAIA, 2011).

Quando são utilizadas adições ao cimento Portland, muitas são as vantagens obtidas desse processo, desde vantagens ambientais até econômicas, como o aproveitamento de resíduos industriais, a redução no uso do clínquer e, conseqüentemente, a menor emissão de CO<sub>2</sub> decorrente do consumo de combustíveis nos fornos e da calcinação do calcário. Portanto, esse uso atende os objetivos da indústria do cimento Portland, tais como: a redução do custo do cimento Portland, redução do consumo de matérias primas, proteção do meio ambiente e melhora na qualidade do cimento (RODRIGUES, 2012).

Por razões tanto técnicas quanto ambientais e econômicas, as adições ao cimento Portland normalizadas vêm sendo cada vez mais utilizadas, como constituintes dos cimentos, moídas em conjunto com o clínquer, ou separadamente (ISAIA, 2011).

Dentro do processo de produção do clínquer, se envolve um alto consumo energético e de emissão de gás carbono na atmosfera, devido à queima da argila e do calcário. Ao substituir parte deste material, muitas são as vantagens: econômicas e ambientais. Segundo Vasconcelos (2013), boa parte das adições utilizadas pela indústria cimenteira provém de resíduos industriais, o que aumenta ainda mais os benefícios ambientais do seu uso. Os principais são: redução do consumo de energia no processo de fabricação do cimento,

diminuição da emissão de CO<sub>2</sub> na atmosfera, contribuição para evitar o esgotamento precoce de jazidas de calcário, contribuição para a reciclagem de rejeitos industriais.

As adições minerais são divididas em três grandes grupos: os materiais cimentícios – como as escórias de alto-forno; os materiais pozolânicos – as cinzas volantes, a sílica ativa; e os materiais não reativos – como o *filler* calcário (RODRIGUES, 2012).

As adições inertes não reagem quimicamente com a pasta de cimento, porém, devido à característica física de serem extremamente finas, provocam o efeito *filler* (VASCONCELOS 2013; RODRIGUES, 2012). Ou seja, as adições inertes objetivam melhorar o empacotamento granulométrico e criar pontos de nucleação para a hidratação dos grãos de cimento. Como resultado se obtém argamassas e concretos com melhor trabalhabilidade no estado fresco e menor porosidade no estado endurecido. Para produção deste tipo de adição, normalmente, se utiliza calcário, pó de pedra e pó de quartzo.

As adições cimentantes têm propriedades aglomerantes e produzem produtos hidratados similares ao do clínquer, porém, normalmente hidratam e ganham resistência mecânica lentamente. Os seguintes resíduos industriais são utilizados como adições cimentantes: escória granulada de alto-forno e cinza volante com alto teor de cálcio (VASCONCELOS, 2013; RODRIGUES, 2012).

As adições pozolânicas, de acordo com a ABNT NBR 12653 (1992), são definidas como materiais silicosos ou sílico-aluminosos que por si só possuem pouca ou nenhuma propriedade cimentícia, mas quando finamente dividido e na presença de umidade, reage quimicamente com os produtos hidratados do clínquer para formar compostos com propriedades cimentantes. São exemplos de pozolanas: cinzas vulcânicas, cinzas volantes com baixo teor de cálcio, cinza da casca de arroz, sílica ativa e metacaulim.

As pozolanas são classificadas ainda pela norma ABNT NBR 12653 (1992) em duas categorias de acordo com a origem do material: Natural e Artificial. As naturais, de origem vulcânica, que não precisam de qualquer tipo de tratamento para sua utilização como material pozolânico, e as artificiais, sendo necessárias para este tipo a utilização de tratamento térmico para que possam adquirir propriedades pozolânicas, sendo também classificadas como subprodutos industriais. Tanto as pozolanas artificiais quanto as naturais podem necessitar de peneiramento, britagem e moagem para adquirirem uma granulometria adequada para serem utilizadas como adição.

## 2.2 A cinza do bagaço da cana-de-açúcar como adição pozolânica

De origem asiática, a cana-de-açúcar é uma planta do gênero *Saccharum* e se desenvolve em regiões de climas tropicais e subtropicais. O seu cultivo no Brasil data-se desde o início da colonização portuguesa (RODRIGUES, 2012).

Segundo Rodrigues, (2012) a cana-de-açúcar é dividida em colmos (onde está concentrada a sacarose), pontas e folhas. Na figura 3.3, são apresentadas as partes constituintes da cana-de-açúcar.

**Figura 2.3 - Partes constituintes da cana-de-açúcar.**

O diagrama mostra uma planta de cana-de-açúcar com suas partes principais rotuladas. No topo, há uma seção rotulada como 'Pontas', que indica a parte superior da planta onde as folhas novas estão se desenvolvendo. Abaixo disso, há uma seção rotulada como 'Folhas verdes', que mostra as folhas maduras e saudáveis. O corpo principal da planta é rotulado como 'Colmos', que são os caules onde a sacarose é armazenada. Na base da planta, há uma seção rotulada como 'Folhas secas', que mostra as folhas que já foram colhidas e estão secando. A planta é mostrada crescendo em um solo, com raízes visíveis na base.

Fonte: Rodrigues (2012).

Cinza de biomassa é um tipo de resíduo resultante da queima de fontes de energias renováveis, resíduos da agricultura e de resíduos agroindustriais (RODRIGUES, 2012). Muitas pesquisas com aplicações de resíduos agroindustriais como adições minerais têm se desenvolvido nas últimas décadas.

O bagaço é um dos subprodutos da produção da cana-de-açúcar, bem como a sacarose e a palha. Atualmente utiliza-se o bagaço gerado da usina na produção da energia, tornando a usina autossustentável energeticamente e, em alguns casos, há a venda do



excedente de energia para distribuidoras (NUNES et. al., 2008). A queima do bagaço da cana é a principal forma de geração de energia dentro de uma usina de cana-de-açúcar. Esta produz uma grande quantidade de cinza pesada que se deposita no fundo das caldeiras, composta basicamente de materiais inorgânicos.

A cinza do bagaço da cana-de-açúcar é um material pulverulento que dependendo da temperatura em que foi produzida apresenta diferentes tons de cinza. A temperatura de combustão do bagaço de cana dentro das caldeiras costuma variar de usina para usina e também é influenciada pelo teor de umidade do bagaço utilizado. Normalmente não há um controle rigoroso das condições de queima, de forma que as temperaturas dentro das caldeiras das usinas podem variar de 300°C a 1.000°C. A CBCA, independente do seu processo de produção, apresenta elevada porosidade e é composta por uma grande quantidade de SiO<sub>2</sub>, que pode chegar a 98% da massa da CBCA e pequenas proporções de FeO<sub>3</sub>, AlO<sub>3</sub> e outros óxidos (VASCONCELOS, 2013).

A cinza do bagaço apresenta, em termos de óxidos, uma grande quantidade de dióxido de silício, normalmente acima de 60% (em massa). O silício é absorvido do solo pelas raízes na forma de ácido monossílico (H<sub>4</sub>SiO<sub>4</sub>) e, após a saída da água das plantas por transpiração, deposita-se na parede externa das células da epiderme como sílica gel. O acúmulo de silício entre a cutícula e a parede das células da epiderme funciona como uma barreira física à penetração de fungos patogênicos e reduz a perda de água por transpiração (CORDEIRO, 2006). Outra possível fonte de sílica para a cinza é a areia (quartzo), oriunda da lavoura. Esta areia pode não ter sido completamente retirada da cana após o processo de lavagem que antecede a moagem. Esta água utilizada no processo de lavagem é reaproveitada para limpar a caldeira, fazendo com que areia se misture à CBCA produzida (CORDEIRO 2006).

A CBCA tem características físico-químicas que se assemelham bastante à cinza da casca de arroz, resíduo industrial empregado como adição pozolânica. Sua reduzida granulometria, sua elevada porosidade e principalmente sua composição química com a preponderância de silicatos e aluminatos lhe confere um enorme potencial para ser incorporado ao cimento Portland como adição (CALDAS et. al. 2000; CORDEIRO 2006).

Segundo Vasconcelos (2013) e Cordeiro (2006), para o aumento da reatividade da CBCA há vários caminhos, se destacando o controle da temperatura de queima do bagaço de forma a garantir que a sílica permaneça no estado amorfo e que o carbono presente no material orgânico seja liberado em forma de gás, e pelo tratamento físico de moagem, uma

vez que, quanto mais fina for a CBCA mais reativa será, pois haverá maior área de contato da cinza com a pasta de cimento gerando grande número de pontos de nucleação para a reação pozolânica.

### **2.3 Métodos de avaliação da atividade pozolânica**

Muitos são os métodos considerados tradicionais para a determinação da atividade pozolânica, divididos em métodos físicos - os que avaliam a resistência mecânica como parâmetro e os métodos químicos - que mensuram de forma direta ou indireta a reação química que caracteriza a existência da atividade pozolânica (VASCONCELOS, 2013).

Fortes são as críticas apresentadas aos métodos físicos existentes e relacionados ABNT NBR 12653 (1992). A ABNT NBR 5751 (2012) que determina o índice de atividade pozolânica com cal hidratada e a ABNT NBR 5752 (1992) que determina o índice de atividade pozolânica com cimento Portland (GAVA, 1999; CORDEIRO, 2006; CORDEIRO, 2009; VASCONCELOS, 2013). Os dois últimos métodos têm como parâmetro de atividade pozolânica a determinação da resistência à compressão, porém, fixam o índice de consistência como parâmetro de dosagem das misturas, o que acarreta em diferentes relações água/aglomerante nas misturas ensaiadas. Como se sabe, a resistência mecânica está diretamente relacionada com a relação água/aglomerante, logo, sua variação influencia a possível atividade pozolânica.

Os métodos químicos mais tradicionais prescritos por normas brasileiras são o método Chapelle modificado ABNT NBR 15895 (2010) e o de Fratini ABNT NBR 5753 (1992), existindo ainda o Método de Luxan (LUXAN et al., 1989) que utiliza conceitos de condutividade elétrica para avaliar a atividade pozolânica. A principal característica destes métodos é a obtenção de resultados rápidos, em comparação aos ensaios de resistência mecânica, porém sofrem críticas comuns. Estes métodos não acompanham a evolução da reação pozolânica, mas são bastante úteis, uma vez que fornecem rapidamente parâmetros sobre o potencial pozolânico de um material estudado, sem que sejam necessários estudos de longo prazo (VASCONCELOS, 2013).

Uma técnica que vêm sendo utilizada para avaliar pozolanas tem sido o ensaio de condutividade elétrica, uma vez que apresenta a vantagem de se obter resultados rápidos,

quando comparados com outros ensaios de avaliação de pozolanicidade. Este ensaio é utilizado para medir a cinética da reação, porém baseia-se na diminuição da condutividade elétrica (íons na pasta) com o aumento do teor de substituição de aglomerante por pozolana (PONTES, 2011; TEXEIRA 2010; SOARES 2010).

Segundo Pontes (2011), na pasta de cimento estão presentes íons em solução que, quando sujeitos a uma diferença de potencial, permitem que haja a condutividade entre dois polos de carga oposta. Quando se desenvolve uma reação pozolânica, ocorre uma diminuição do teor em íons, uma vez que estes são combinados com os silicatos, sílico-aluminatos e aluminatos, diminuindo a condutividade do meio e conseqüentemente a concentração de CH na solução. O decréscimo de íons de  $\text{Ca}^{2+}$  devido ao aumento de fases de CSH diminui a condutividade elétrica, da qual a velocidade da mudança depende, se a reatividade da pozolana for alta ou baixa (TEXEIRA, 2010; SOARES, 2010; VILLAR-COCIÑA, 2005). Este fato torna possível medir a cinética da reação através da variação da condutividade do meio ao longo do tempo.

Rassk e Bhaskar apud Villar – Cociña (2005) foram os primeiros a desenvolver um método para avaliar a atividade pozolânica por medida de condutividade elétrica. Com o método fez-se a medição da quantidade de sílica dissolvida em uma solução na qual o material reativo foi disperso e calculou-se o índice de atividade pozolânica.

Luxán *et al.* (1989) trabalharam com um método simples e rápido para avaliar de forma indireta a atividade pozolânica das pozolanas naturais, provenientes da Espanha. O método é baseado na medida da condutividade elétrica da suspensão hidróxido de cálcio/pozolana. O método de Lúxan (LUXAN *et al.*, 1989) consiste na medida da variação da condutividade elétrica de uma solução saturada de hidróxido de cálcio ( $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ) com e sem o material testado. Este método utiliza 5 gramas de material em 200 ml de solução saturada de  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  e a variação da condutividade deve ser mensurada durante 120 segundos. Sendo a diferença entre a condutividade final e inicial o indicador da pozolanicidade do material. Alguns autores estabeleceram metodologias similares que utilizam o princípio da condutividade elétrica (PAYÁ *et al.*, 2003; TEXEIRA, 2010).

Payá *et al.* (2001) propuseram um método rápido para avaliar o comportamento da cinza volante em uma solução de hidróxido de cálcio, baseado no método de Luxan *et al.* (1989), para diversos tempos de reação (100, 1000 e 10000 s). Os autores utilizaram uma solução insaturada de hidróxido de cálcio, em uma concentração de 800 mg de  $\text{Ca}(\text{OH})_2/\text{L}$  de água deionizada e temperatura de 80 °C, para aumentar a taxa de dissolução do  $\text{Ca}(\text{OH})_2$ . Ao

colocar a cinza volante no sistema, realizaram medições em sistemas com temperaturas de 40°C, 60°C e 80°C. Além disso, consideraram a condutividade das pozolanas dispersas em água, pois muitas partículas de sódio, potássio e cálcio podem ficar aderidas na superfície das partículas e esses sais solúveis podem influenciar nos valores de condutividade do sistema. Uma perda relativa de condutividade foi estabelecida, para a comparação dos dados, e a determinação desse parâmetro para intervalos de tempo de 100 s, 1000 s e 10000 s foi proposta para avaliar a atividade pozolânica dos materiais avaliados (RODRIGUES, 2012).

Villar-Cociña *et al.* (2003) realizaram experimentos com medição da condutividade elétrica da mistura saturada de CH-pozolana e medições das pozolanas em água para avaliar a contribuição da condutividade dos íons  $\text{Na}^+$ ,  $\text{K}^+$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ , dentre outros. Os autores propuseram um modelo matemático cinético-difusivo que permite descrever a cinética de reação das pozolanas avaliadas e calcularam os coeficientes cinéticos (coeficiente de difusão e a constante da taxa de reação). Esse método avalia os aspectos qualitativo e o quantitativo da reação pozolânica, pois é obtido um índice de atividade pozolânica para os materiais avaliados.

Villar Cociña *et al.* (2003; 2011) defendem a utilização deste método com o argumento que a cinética da reação pozolânica é avaliada pela diminuição da portlandita solúvel e o aumento de compostos hidratados, como CSH, CAH (aluminato de cálcio hidratado) e CASH (sílico-aluminatos de cálcio hidratado).

### **3 MATERIAIS E MÉTODOS**

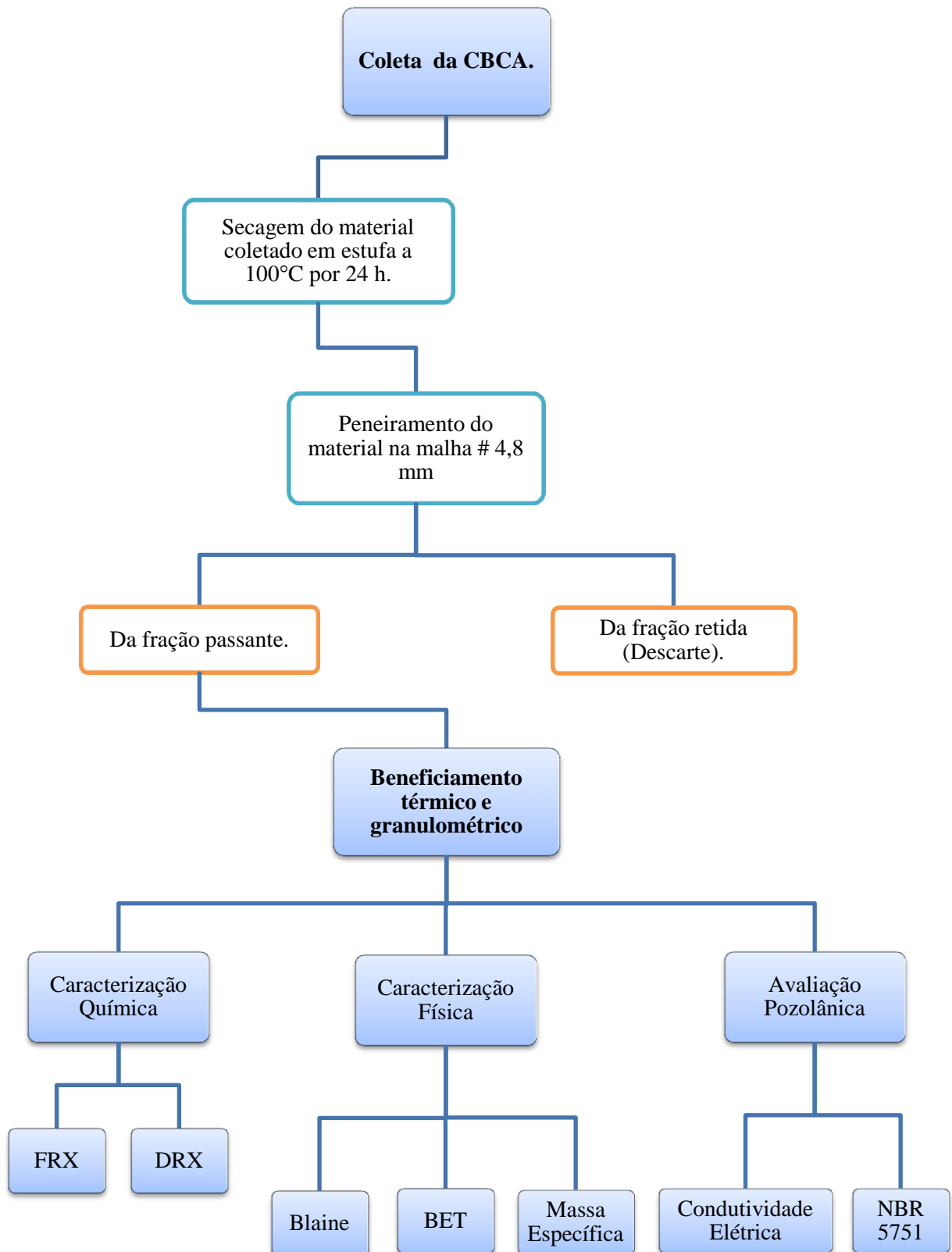
#### **3.1 Programa Experimental**

O presente programa experimental foi elaborado com o objetivo de analisar o comportamento da atividade pozolânica das cinzas do bagaço de cana-de-açúcar (CBCA). Para isto, foram realizadas queimas em diferentes temperaturas, processo de peneiramento e moagem.

As cinzas foram avaliadas quanto a sua reatividade, por meio de caracterizações físicas, químicas e avaliação da sua pozolanicidade. Os ensaios para determinação da atividade pozolânica utilizando métodos de condutividade elétrica foi definido como tema central do programa experimental, sendo ainda avaliado o índice de atividade pozolânica com cal, utilizando a ABNT NBR 5751 (2012).

O desenvolvimento desta pesquisa foi realizado no Laboratório de Construção Civil da UFPE – CAA, Caruaru/PE. As etapas desenvolvidas são apresentadas no fluxograma experimental, conforme Figura 3.1.

Figura 3.1 - Fluxograma do Programa Experimental.



Fonte: O autor (2016).

## 3.2 Materiais

### 3.2.1 Tipos de pozolanas: CBCA e pozolana de referência (MTC)

Neste trabalho foram utilizados dois tipos de pozolanas: a cinza do bagaço da cana-de-açúcar (CBCA) objeto de estudo e o metacaulim, material pozolânico de referência (MTC), comercializado no mercado do estado de Pernambuco.

Segundo Isaia (2011) o metacaulim é um material aluminossilicoso obtido a partir da calcinação de alguns tipos de argilas, tais como as caulínicas e os caulins de alta pureza, a uma temperatura que varia entre 600°C e 900°C.

O metacaulim utilizado, produzida pela empresa Caulim do Nordeste S.A. possui cor alaranjada e uma granulometria fina. Na Tabela 3.1 consta a análise química realizada por fluorescência de raios - X no Departamento de Geologia da UFPE. O resultado demonstra elevadas concentrações de óxidos de sílica, alumínio e ferro.

**Tabela 3.1 - Composição química (% óxidos) e perda ao fogo do metacaulim (MTC).**

<b>Óxidos:</b>	<b>Resultado (%)</b>	<b>Óxidos:</b>	<b>Resultado (%)</b>
<b>CaO</b>	1,0	<b>SiO<sub>2</sub></b>	<b>49,3</b>
<b>Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub></b>	<b>32,9</b>	<b>Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub></b>	<b>10,3</b>
<b>SO<sub>3</sub></b>	0,1	<b>MgO</b>	0,3
<b>TiO<sub>2</sub></b>	1,7	<b>Na<sub>2</sub>O</b>	0,1
<b>P<sub>2</sub>O<sub>5</sub></b>	0,2	<b>K<sub>2</sub>O</b>	1,7
<b>MnO</b>	0,1	<b>ZrO<sub>2</sub></b>	0,1
<b>SrO; CuO; V<sub>2</sub>O<sub>5</sub></b>	-	<b>Perda ao Fogo</b>	1,7
<b>TOTAL</b>		<b>99,5 %</b>	

Fonte: O autor (2016).

A Cinza do bagaço da cana-de-açúcar utilizada neste trabalho é proveniente do processo de produção de álcool e açúcar de uma usina localizada no Estado de Pernambuco.

A queima do bagaço da cana foi realizada em caldeira a uma temperatura de aproximadamente 300°C, para geração da cinza. O processo de produção da cinza é ilustrado nas Figuras 3.2 e 3.3, respectivamente.

**Figura 3.2 - Bagaço da cana-de-açúcar antes da queima.**



Fonte: O autor (2016).

**Figura 3.3 - Processo de queima do bagaço da cana-de-açúcar em caldeira.**



Fonte: O autor (2016).

A cinza coletada apresenta cor escura e granulometria grosseira, indicando uma cinza com elevado teor de carbono.

Para sua homogeneização, a cinza foi seca em estufa a 100°C por 24h e depois passou pela peneira de abertura 4,8mm para retirada de impurezas como restos de folha e galhos, sendo o material retido descartado.



É apresentada na Tabela 4.2 a análise química por fluorescência de raios - X do material passante na # 4,8 mm (*in natura*). O resultado demonstra a alta concentração de sílica da amostra, superior a 89% da massa da cinza.

**Tabela 3.2 - Composição química (% óxidos) e perda ao fogo da CBCA.**

<b>Óxidos:</b>	<b>Resultado (%)</b>	<b>Óxidos:</b>	<b>Resultado (%)</b>
<b>CaO</b>	0,7	<b>SiO<sub>2</sub></b>	<b>89,2</b>
<b>Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub></b>	<b>2,2</b>	<b>Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub></b>	<b>1,7</b>
<b>SO<sub>3</sub></b>	0,3	<b>MgO</b>	0,3
<b>TiO<sub>2</sub></b>	0,3	<b>K<sub>2</sub>O</b>	2,3
<b>P<sub>2</sub>O<sub>5</sub></b>	0,7	<b>Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub></b>	-
<b>NiO; MnO</b>	-	<b>Perda ao Fogo</b>	2,14
<b>TOTAL</b>		<b>99,84 %</b>	

Fonte: O autor (2016).

### 3.2.2 Hidróxido de Cálcio

Para o ensaio de condutividade elétrica foi utilizado o hidróxido de cálcio - CH (P.A.) da marca *Synth*, com teor mínimo de pureza de 95%. A grande vantagem de utilizar esse material na produção das pastas é que o teor de CH disponível é mais elevado quando comparado com pastas de cimento Portland, o que favorece a sua reação com a pozolana.

### 3.2.3 Cal Hidratada

Para a confecção dos corpos de prova pelo método adotado na ABNT NBR 5751 (2012), a cal hidratada utilizada foi a CH-I da marca Tradical. Seu valor reduzido de carbonato de cálcio foi o principal motivo para escolha dessa matéria-prima, frente às demais cales presentes no mercado brasileiro. A Tabela 3.3, apresenta a análise química, fornecidas pelo fabricante, da cal hidratada.

**Tabela 3.3 - Análise química da cal hidratada CH-I.**

<b>Caracterização</b>	<b>Resultado (%)</b>
<b>Química:</b>	
CaO	71,70
MgO	0,75
Resíduo Insolúvel	1,13
Umidade	0,62
Perda ao Fogo	25,50
CO <sub>2</sub>	1,59
SO <sub>3</sub>	0,25
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> + Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,74

Fonte: Tradical (2015).

#### 3.2.4 Areia

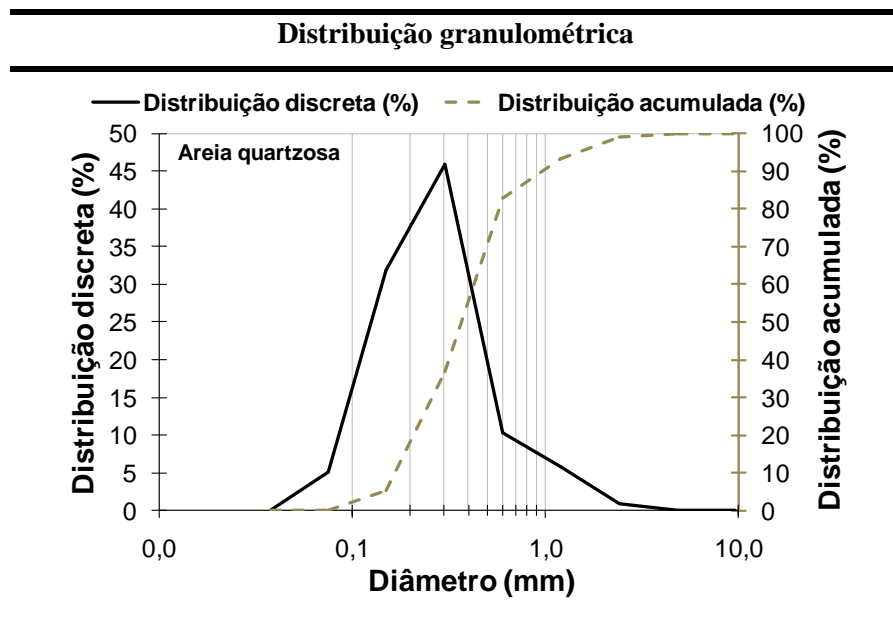
No preparo dos corpos de prova de argamassa foi utilizada a areia quartzosa, lavada, passada na peneira de abertura de 4,8 mm. A secagem da fração passante ocorreu em estufa a 105°C por 24 horas, após esse procedimento o material foi armazenado em baldes para a espera da sua utilização. Nas tabelas 3.4 e 3.5 são apresentadas as características físicas e a distribuição granulométrica do agregado miúdo – areia quartzosa, respectivamente.

**Tabela 3.4 - Características físicas da areia quartzosa.**

<b>Características físicas</b>	<b>Resultado</b>
Massa específica ABNT NBR 9776 (1987):	2,65 Kg/dm <sup>3</sup>
Módulo de finura ABNT NBR 7217 (1987):	1,83

Fonte: O autor (2016).

Tabela 3.5 - Distribuição granulométrica da areia quartzosa.



### 3.2.5 Aditivo

No ensaio da ABNT NBR 5751 (2012) foi utilizado o aditivo plastificante quartzolite produzido pela Weber – SAINT-GOBAIN à base de surfactantes. Sua incorporação teve como objetivo manter a mesma relação água / materiais secos. As propriedades e características do aditivo são apresentadas na tabela 3.6.

Tabela 3.6 - Propriedades e Características do Aditivo plastificante quartzolite.

Propriedades e características	Resultado
Base de formulação	Surfactantes
Massa específica	1,002 a 1,004 Kg/dm <sup>3</sup>
pH	4,5 a 7,5
Teor de sólidos	3,0 a 4,0%

Fonte: Boletim técnico fornecido pela Weber – Saint Gobain (2015).

### 3.3 Planejamento Experimental

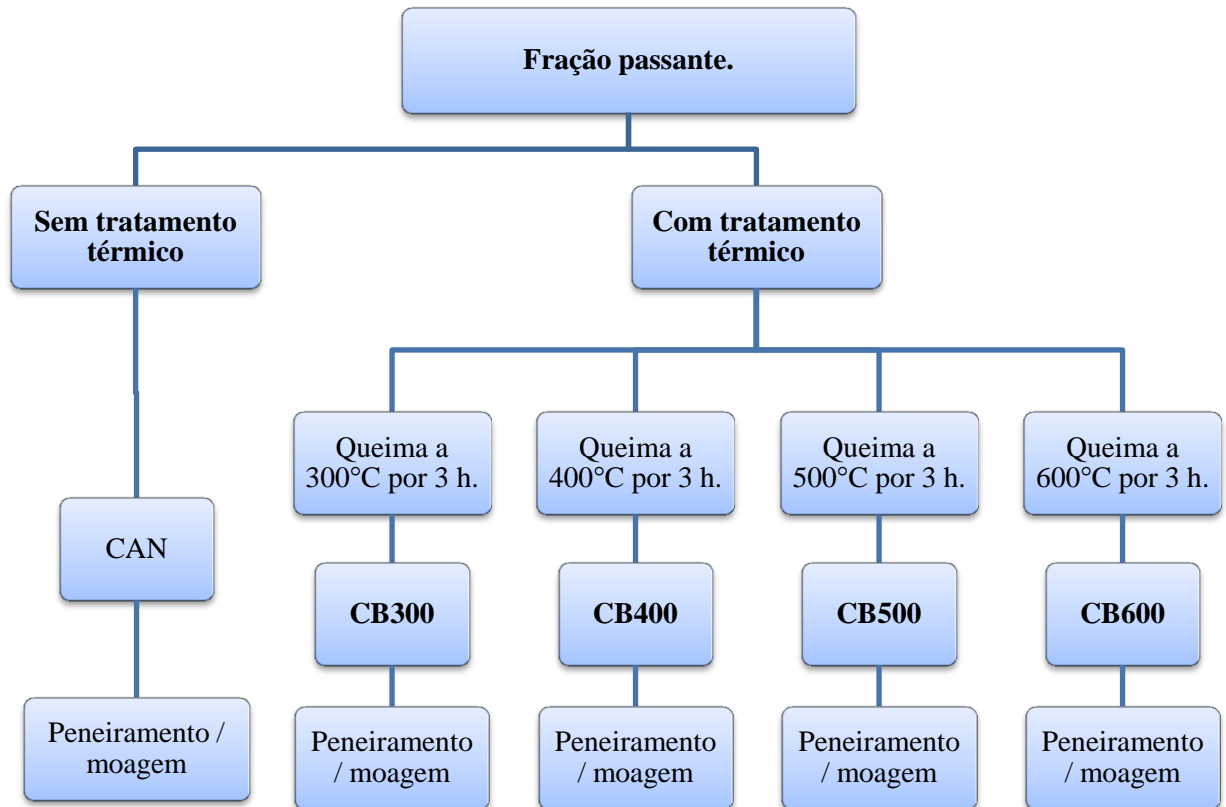
A CBCA foi preparada para receber dois tipos de tratamento utilizados neste projeto: a calcinação e o peneiramento/moagem. O material pozolânico de referência (MTC) não sofreu qualquer tipo de tratamento, pois, trata-se de um material adquirido no mercado, portanto, pronto para utilização. Todos os procedimentos adotados no tratamento e preparo da CBCA foram adotados de acordo com o levantamento bibliográfico do tema.

A preparação inicial da CBCA consistiu nas seguintes etapas:

- Inicialmente a CBCA foi seca em estufa a 100°C por 24 horas e peneirada na malha de abertura de 4,8 mm para a retirada de materiais contaminantes (pedras, folhas, etc.).
- O material retido deste preparo inicial foi descartado.
- O material passante, foi dividido em cinco frações e seguiu para os tratamentos previstos. Desse preparo inicial foi denominado de cinza do bagaço de cana-de-açúcar “*in natura*” (CAN).

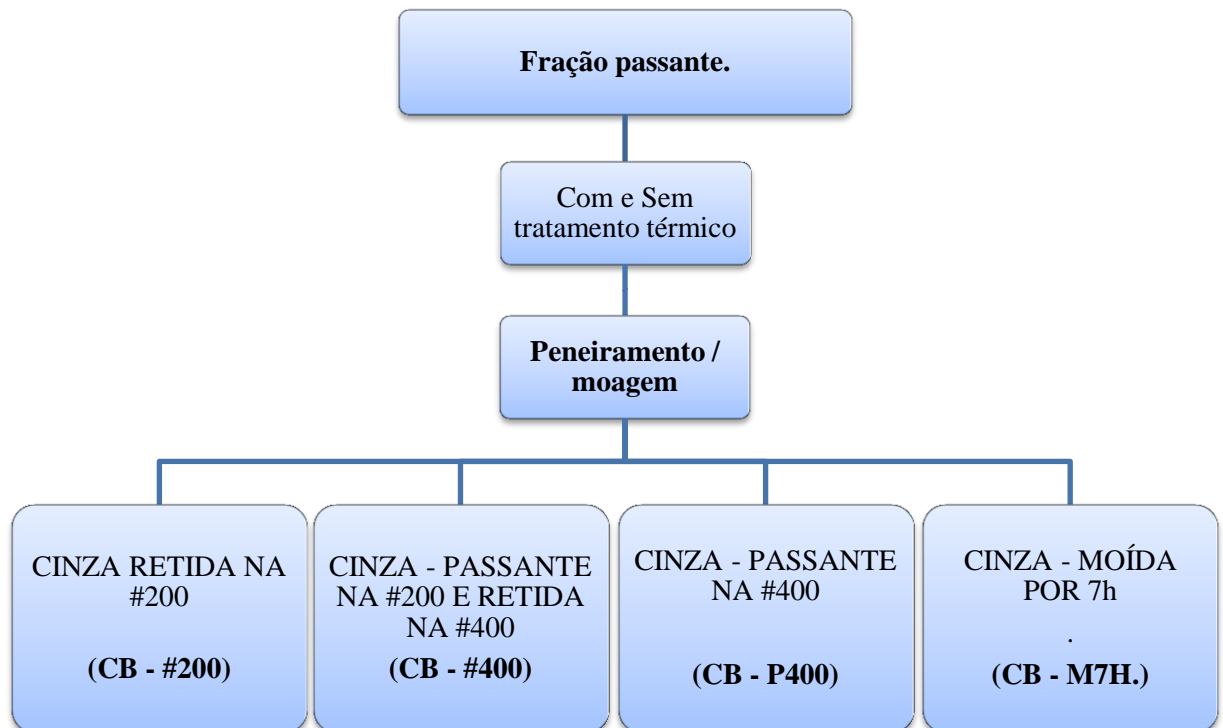
A metodologia aplicada para ao beneficiamento aplicado nas CBCA é apresentado pelo fluxograma de beneficiamento térmico e de peneiramento/moagem, conforme as Figuras 3.4 e 3.5 respectivamente.

Figura 3.4 - Fluxograma do Programa Experimental do tratamento térmico.



Fonte: O autor (2016).

Figura 3.5 - Fluxograma do Programa Experimental do tratamento de peneiramento / moagem



Fonte: O autor (2016).

### 3.3.1 Calcinação da CBCA

A queima da cinza de cana-de-açúcar a diferentes temperaturas foi objeto de estudo desse trabalho, com o intuito de avaliar qual seria a melhor condição para obtenção de cinza mais reativa. As temperaturas de queima estudadas foram de 300 °C, 400 °C, 500 °C e 600 °C e o resfriamento da mufla foi natural (resfriamento lento).

Para esse trabalho foi adotada a queima da cinza do bagaço da cana-de-açúcar em um único patamar (temperatura máxima desejada). A taxa de aquecimento adotada para a queima foi de 10 °C/min.

O forno utilizado foi do tipo mufla com dimensões internas de 170 x 190 x 250 mm, da marca Fornos Lavoisier, com aquecimento até 1200 °C. Para a queima foram colocados 500 g de CBCA em bandejas de ferro e levado a mufla, como apresentado na Figura 3.6.

**Figura 3.6 – Procedimento de queima das CBCA em mufla.**



a) Mufla utilizada no processo de queima das CBCA.

b) Bandeja de ferro para Calcinação da CBCA.

c) Calcinação das CBCA em mufla por 3h.

Fonte: O autor (2016).

O procedimento adotado na queima das cinzas foi:

- Ligar a mufla colocar a CBCA “in natura” e esperar a mufla atingir o valor máximo estipulado de temperatura.

- Ao atingir o valor máximo, o tempo de permanência do material nessa temperatura foi de 3 horas.
- Ao término desse período, a mufla foi desligada e aberta, automaticamente se iniciou o processo natural de resfriamento.

As cinzas foram denominadas de acordo com a temperatura máxima de queima, recebendo as seguintes nomenclaturas: CB300 (temperatura máxima de queima foi de 300°C), CB400 (queima a 400°C), CB500 (queima a 500°C) e CB600 (queima de 600°C).

### 3.3.2 Peneiramento / moagem da CBCA

O processo de tratamento de peneiramento / moagem aplicado nas CBCA, teve como objetivo obter quatro patamares de finura do material estudo.

Todas as cinzas que tiveram ou não beneficiamento térmico passaram por um processo de peneiramento mecânico. Para este procedimento houve uma adaptação do conjunto de peneiras granulométricas quadradas com dimensões 50 x 50 x 10 cm, da marca Pavitest, que permite a troca de tela, conforme a Figura 3.7.

**Figura 3.7 – Adaptação adotada para o processo de peneiramento das CBCA**



a) Adaptação para a malha #200 do processo de peneiramento.

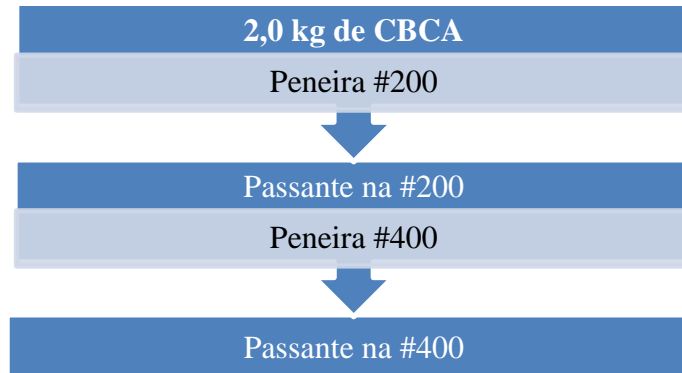


b) Conjunto de peneiras utilizado no processo de peneiramento das CBCA.

Fonte: O autor (2016).

Foi adotado o seguinte procedimento: Pesar 2,0 kg de cinza e colocar na seguinte sequência de peneiras, conforme a ilustração esquemática da figura 4.6.

**Figura 3.8 - Procedimento do tratamento de peneiramento.**



Fonte: O autor (2016).

Para estratificar as amostras, foi definido um número fixo de peneiramentos e intervalos, obedecendo a seguinte configuração: 6 ciclos de peneiramento mecânico de 15 minutos, com intervalo de 5 minutos (esse intervalo foi adotado devido as condições do equipamento, o mesmo não suporta o tempo total de uma hora e trinta minutos ininterrupto de peneiramento) – Totalizando em torno de 2 horas de procedimento.

No fim do peneiramento obtiveram-se as seguintes amostras: as cinzas retidas na peneira de malha 200 (#200), passante na malha 200 e retida na malha 400 (#400) e passante na malha 400 (P400), amostras foram recolhidas e guardadas em potes com as devidas identificações.

A moagem das cinzas foi realizada em um moinho rotativo de bolas da marca Tecnal, como mostrado na Figura 3.9. Foram utilizadas 71 bolas correspondentes a uma massa de 3000 g, como apresentado na Tabela 3.7. A velocidade de rotação foi de 200 RPM e o período de moagem foi de 7 horas. Para a moagem foram utilizados 1,300 Kg de cada uma das amostras de cinza (CAN, CB300, CB400, CB500 e CB600).



**Tabela 3.7 – Relação de bolas de alumina, com diâmetros, massas e volumes utilizadas na moagem das CBCA.**

<b>Número de Bolas:</b>	<b>Diâmetro das bolas (mm)</b>	<b>Massa (g)</b>	<b>Volume (mL)</b>
3	20	74,41	100
53	25 a 30	1730,16	1000
15	35	1195,43	900
<b>TOTAL</b>		<b>3000,00</b>	<b>2000</b>

Fonte: O autor (2016).

**Figura 3.9 – Moinho de bolas e processo de moagem das CBCA.**



a) Moinho de bolas.

b) CBCA para moagem.

c) CBCA moída por 7 horas.

Fonte: O autor (2016).

Desse procedimento obtiveram-se três variações sem moagem, sendo os materiais: retido na peneira de N° 200, retido na de N° 400 e a passante na peneira de N° 400 e uma moída por 7H. Após o peneiramento e moagem das amostras no moinho de bolas, as mesmas foram encaminhadas para os ensaios previstos.

Definidos todos os tipos de pozolanas e tipos de tratamento, na Tabela 3.8 é apresentado o quadro resumo das amostras obtidas com os tratamentos previstos. Ao fim desta etapa de preparo das amostras, tem-se um total de 21 tipos de amostras que serão caracterizadas e submetidas aos ensaios previstos, conforme será descrito posteriormente.

**Tabela 3.8 - Quadro resumo das amostras a produzidas e suas respectivas denominações.**

<b>AMOSTRAS</b>	<b>DESCRIÇÃO</b>
<b>MTC</b>	Metacaulim - material pozolânico de referência, adquirido no mercado.
<b>CAN#200</b>	CBCA “in natura”, sem moer e retida na peneira N° 200 (0,075 mm).
<b>CAN#400</b>	CBCA “in natura”, sem moer e retida na peneira N° 400.
<b>CANP400</b>	CBCA “in natura”, sem moer e passante na peneira N° 400 (0,038 mm).
<b>CANM7H</b>	CBCA “in natura”, moída por 7 horas no moinho de bolas.
<b>CB300#200</b>	CBCA calcinada a 300°C, RL, sem moer e retida na peneira N° 200.
<b>CB300#400</b>	CBCA calcinada a 300°C, RL, sem moer e retida na peneira N° 400.
<b>CB300P400</b>	CBCA calcinada a 300°C, RL, sem moer e passante na peneira N° 400.
<b>CB300M7H</b>	CBCA calcinada a 300°C, RL, moída por 7 horas no moinho de bolas.
<b>CB400#200</b>	CBCA calcinada a 400°C, RL, sem moer e retida na peneira N° 200.
<b>CB400#400</b>	CBCA calcinada a 400°C, RL, sem moer e retida na peneira N° 400.
<b>CB400P400</b>	CBCA calcinada a 400°C, RL, sem moer e passante na peneira N° 400.
<b>CB400M7H</b>	CBCA calcinada a 400°C, RL, moída por 7 horas no moinho de bolas.
<b>CB500#200</b>	CBCA calcinada a 500°C, RL, sem moer e retida na peneira N° 200.
<b>CB500#400</b>	CBCA calcinada a 500°C, RL, sem moer e retida na peneira N° 400.
<b>CB500P400</b>	CBCA calcinada a 500°C, RL, sem moer e passante na peneira N° 400.
<b>CB500M7H</b>	CBCA calcinada a 500°C, RL, moída por 7 horas no moinho de bolas.
<b>CB600#200</b>	CBCA calcinada a 600°C, RL, sem moer e retida na peneira N° 200.
<b>CB600#400</b>	CBCA calcinada a 600°C, RL, sem moer e retida na peneira N° 400.
<b>CB600P400</b>	CBCA calcinada a 600°C, RL, sem moer e passante na peneira N° 400.
<b>CB600M7H</b>	CBCA calcinada a 600°C, RL, moída por 7 horas no moinho de bolas.

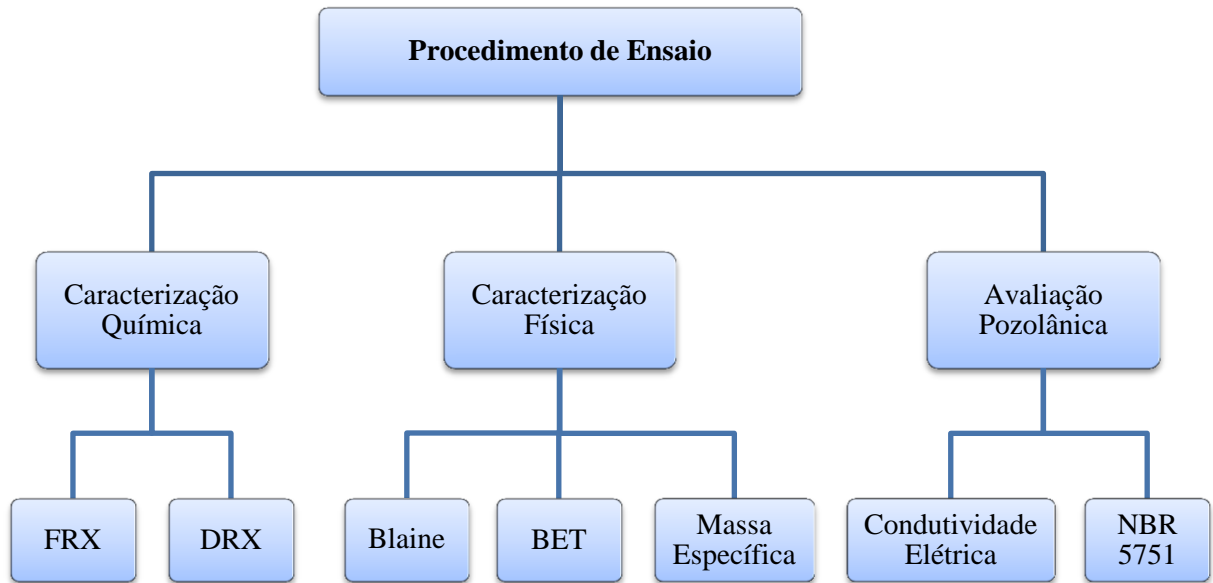
Fonte: O autor (2016).

### 3.4 Procedimentos de Ensaio

Neste trabalho a caracterização foi realizada nas amostras em forma de pó. Os ensaios químicos, físicos, de microestrutura e de avaliação de atividade pozolânica foram realizados em parceria com o Centro de Tecnologias Estratégicas do Nordeste – CETENE, Laboratório de Construção Civil da UFPE/CAA e Laboratório de Construção e Ambiência da FZEA/USP.

Na Figura 4.8 é apresentado o esquema para a caracterização das amostras.

**Figura 3.10 - Esquema para a caracterização das amostras.**



Fonte: O autor (2016).

### 3.4.1 Caracterização Química

#### 3.4.1.1 Fluorescência de Raios – X (FRX) e Perda ao fogo

A composição química das amostras de CBCA e matacaulim foi obtida por meio de análise de fluorescência de raios X semiquantitativa em um espectrômetro Rigaku - RIX 3000 equipado com tubo de Rh. A análise foi realizada no departamento de Geologia da UFPE.

#### 3.4.1.2 DRX

Os ensaios foram realizados em amostras na forma de pó, em equipamento Difractômetro de Raios-X Bruker D8 Advance Davinci do CETENE, sendo utilizados os seguintes parâmetros de ensaio: radiação  $\text{CuK}\alpha$ , dados coletados entre os ângulos  $5^\circ$  a  $75^\circ$

( $2\theta$ ), varredura com passo angular de  $0,02^\circ$  ( $2\theta$ ) com tempo de coleta de 1 segundo por passo, velocidade (SCAN-SPEED) de  $2\theta/\text{min}$ .

### 3.4.2 Caracterização Física

#### 3.4.2.1 Área específica BET

A área superficial específica das cinzas foi determinada por meio da técnica BET (*Brunauer-Emmett-Teller*). Os ensaios foram realizados em um equipamento Gemini 2375, Micromeritics, com pré-tratamento das amostras em temperatura de  $60^\circ\text{C}$  e pressão de  $100\ \mu\text{mHG}$  por 24 horas, no Laboratório de Nanotecnologia do Centro de Tecnologia Estratégicas do Nordeste (CETENE) em Recife-PE.

#### 3.4.2.2 Área específica Blaine

A área específica das CBCA e do MTC foram realizadas pelo método Blaine, segundo a ABNT NBR NM 76 (1998). Este método baseia-se no tempo que determinada quantidade de ar necessita para atravessar uma camada de cimento compactada (ou pó), de dimensões e porosidade especificadas. Em condições normatizadas, a superfície específica do aglomerante é proporcional a  $t$ , onde  $t$  é o tempo necessário para a quantidade de ar atravessar o material ensaiado. Os ensaios foram realizados em um equipamento permeabilímetro de blaine, composta por tubo em "U", célula (êmbolo) de permeabilidade com pistão de socamento e disco perfurado, papel filtro  $\varnothing 9\text{cm}$ , óleo colorido, vazador e pipetador de borracha de 3 vias, acondicionado em estojo de madeira, no Laboratório de Construção Civil da UFPE – CAA.

### 3.4.2.3 Massa específica real

A determinação da massa específica real da cinza foi realizada por meio do multiplicnômetro a gás hélio, Quantachrome Instruments, modelo 1000. O gás hélio é injetado no equipamento para que possa preencher todos os vazios que existem na amostra. A massa específica real é determinada por meio da variação de pressão do gás em um volume calibrado. O ensaio foi realizado no Laboratório de Construções e Ambiente da FZEA-USP.

### 3.4.3 Avaliação da pozolânicidade da CBCA

O ensaio de pozolanicidade consiste em determinar o índice de atividade pozolânica de uma adição mineral. Neste trabalho a avaliação da atividade pozolânica foi realizada por meio do método de condutividade elétrica, e da ABNT NBR 5751 (2012).

#### 3.4.3.1 Medida de Condutividade elétrica

Para a análise da condutividade elétrica, foi realizada da medição em uma solução com o hidróxido de cálcio, água deionizada e cinza.

As medições de condutividade elétrica de solução CH/adiação mineral (LUXÁN, et al., 1989; PAYÁ et al., 2001), seguiram as seguintes etapas:

- Colocar 250 ml de água deionizada em becker de vidro graduado e verter no balão volumétrico de fundo chato de três bocas paralelas;
- Aquecer a água do balão em cima da base do agitador magnético, sob agitação com velocidade de 900 RPM, até atingir a temperatura de 40°C estipulada no controlador digital e deixá-la estabilizar;
- Pesar 450 mg de hidróxido de cálcio  $\text{Ca(OH)}_2$  em balança de precisão (0,0001g);
- Com a água estabilizada a 40 °C adicionar 450 mg de  $\text{Ca(OH)}_2$  no balão sobre o agitador magnético com aquecimento para se obter uma solução saturada de CH;

- Deixar a solução ficou sob agitação durante 1 h para garantir que todo CH seja dissolvido;
- Pesar 5,25 g de adição mineral na balança de precisão - (precisão 0,0001g);
- Após 1 h, com a temperatura da solução 40 °C, iniciou-se a coleta de valores de condutividade elétrica por meio de um condutivímetro elétrico, com um programa de coleta de dados, e a célula de condutividade de aço inox, com leitura de 0,001  $\mu\text{S}/\text{cm}$  a 20000  $\mu\text{S}/\text{cm}$ ;
- Colocar imediatamente 5,25 g de adição mineral na solução CH/água;
- As informações deste trabalho foram coletadas durante 24 h, por um computador acoplado ao sistema do condutivímetro.

**Figura 3.11 – Ensaio de atividade pozolânica pelo método de condutividade elétrica do sistema CH/cinza.**



Fonte: O autor (2016).

### 3.4.3.2 Índice de Atividade Pozolânica - ABNT NBR 5751 (2012)

A determinação do índice de atividade pozolânica em materiais pozolânicos através do índice de atividade com cal (IAC) é realizada pela ABNT ABNT NBR 5751 (2012), sendo o IAC a resistência à compressão de argamassas confeccionadas com cal hidratada e o material pozolânico. Para que esteja em conformidade com a ABNT NBR 12653 (1992), deve-se apresentar resistência média maior ou igual a 6 MPa. A principal crítica deste método no Brasil está na utilização da cal hidratada, visto que em função da baixa qualidade das cales no mercado, torna-se difícil encontrar uma cal que atenda as exigências estabelecidas pela norma.

A ABNT NBR 5751 (2012) estabelece sistematicamente uma série de procedimentos no que tange ao preparo das argamassas e dos corpos-de-prova para a determinação do IAC, destacando-se:

- A argamassa deve conter uma parte, em massa, de hidróxido de cálcio e mais uma quantidade de material pozolânico, que corresponda ao dobro do volume do hidróxido de cálcio;
- A quantidade de água para a mistura deve corresponder a um índice de consistência de  $(225 \pm 5)$  mm obtido no ensaio de abatimento, conforme prescreve a ABNT NBR 7215(1996);
- A cura dos corpos-de-prova é realizada nos próprios moldes vedados durante 7 dias, sendo colocados em ambiente com 100% de umidade relativa e temperatura de  $(23 \pm 2)$  °C durante  $(24 \pm 2)$  horas e, em seguida, acondicionados em uma temperatura de  $(55 \pm 2)$  °C, durante  $(1446 \pm 2)$  horas.

A preparação das argamassas se deu da seguinte maneira:

- Preparar as formas com óleo.
- Pesar todo o material, deixando apenas a água e a cal hidratada para pesar apenas no momento da moldagem.
- A cinza e a cal hidratada devem ser misturados e bem homogeneizados em recipiente fechado, durante 2 minutos.

- Colocar toda a água de amassamento na cuba da argamassadeira.
- A mistura cinza mais a cal hidratada deve ser colocada na cuba. Misturar os materiais com o misturador na velocidade baixa, durante 30 s.
- Após este tempo, e sem paralisar a operação de mistura, iniciar a colocação da areia, com o cuidado de que toda esta areia seja colocada gradualmente durante o tempo de 30s. Imediatamente após o término da colocação da areia, mudar para a velocidade alta, misturando-se os materiais nesta velocidade durante 30 s.
- Após este tempo, desligar o misturador durante 1 min e 30 s.
- Nos primeiros 15 s, retirar, com auxílio de uma espátula, a argamassa que ficou aderida às paredes da cuba e à pá e que não foi suficientemente misturada, colocando-a no interior da cuba.
- Durante o tempo restante (1 min e 15 s), a argamassa deve ficar em repouso na cuba, coberta com pano limpo e úmido.
- Imediatamente após este intervalo, ligar o misturador na velocidade alta, por mais 1 min.
- Para o ensaio de consistência: lubrificar ligeiramente a mesa do aparelho de consistência com óleo mineral; colocar a argamassa no molde troncônico e moldar em 3 camadas (15, 10 e 5 golpes); realizar os 30 golpes em 30 segundos e medir o espalhamento com o paquímetro. O resultado deve ser  $225 \pm 5$  mm.
- Moldar os corpos-de-prova e colocar na mesa de vibração por 1 minuto.
- Acomodar os corpos de prova por 24 horas em caixas previamente preparadas para este fim em local com temperatura de  $(23 \pm 2)$  °C.
- Durante as  $(144 \pm 2)$  h posteriores, os corpos de prova devem ser mantidos a uma temperatura de  $(55 \pm 2)$  °C até  $(4 \pm 0,5)$  h antes do ensaio de ruptura à compressão, quando os corpos de prova devem estar a uma temperatura de  $(23 \pm 2)$  °C

É estabelecido pela ABNT NBR 5751 (2012) que, para a determinação do IAC devem ser confeccionados 3 corpos-de-prova.



## 4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

### 4.1 Caracterizações físicas e químicas

#### 4.1.1 Área superficial das CBCA

Os efeitos dos tratamentos aplicados na CBCA serão abordados neste item no que tange a possível influência nas propriedades quanto à pozolanicidade, como área específica. Na Tabela 4.1, é apresentado o quadro resumo das principais propriedades físicas avaliadas neste trabalho.

**Tabela 4.1 - Quadro resumo das propriedades físicas da CBCA submetida aos tratamentos e dos materiais utilizados na pesquisa**

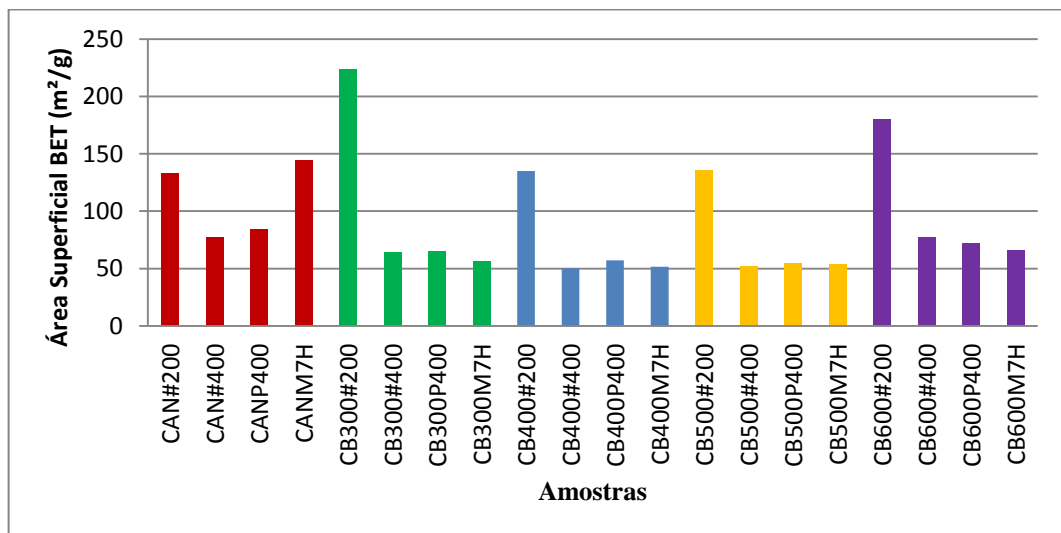
<b>Amostras</b>	<b>Finura Blaine (m<sup>2</sup>/kg)</b>	<b>Área Superficial (BET) (m<sup>2</sup>/g)</b>
<b>CAN#200</b>	307,93	132,89
<b>CAN#400</b>	389,51	76,86
<b>CANP400</b>	1331,54	84,62
<b>CANM7H</b>	1838,44	143,97
<b>CB300#200</b>	279,24	223,23
<b>CB300#400</b>	867,03	64,45
<b>CB300P400</b>	1386,73	64,81
<b>CB300M7H</b>	1853,80	55,97
<b>CB400#200</b>	309,95	134,86
<b>CB400#400</b>	729,45	50,17
<b>CB400P400</b>	1358,83	57,25
<b>CB400M7H</b>	1664,47	51,63
<b>CB500#200</b>	297,94	135,86
<b>CB500#400</b>	816,22	51,60
<b>CB500P400</b>	1383,05	54,30
<b>CB500M7H</b>	1729,92	53,65
<b>CB600#200</b>	279,13	179,50
<b>CB600#400</b>	786,77	77,51
<b>CB600P400</b>	1418,30	71,84
<b>CB600M7H</b>	1933,89	65,56
<b>MTC</b>	2245,49	-

Fonte: Produzido pelo autor.

Um importante parâmetro a ser considerado nas características físicas das cinzas, se dá por meio da avaliação da área específica. Sabe-se que a área específica é um importante parâmetro para a cinética química, e que, quanto maior da área superficial de um material geralmente maior é a taxa de reação química (RODRIGUES, 2012).

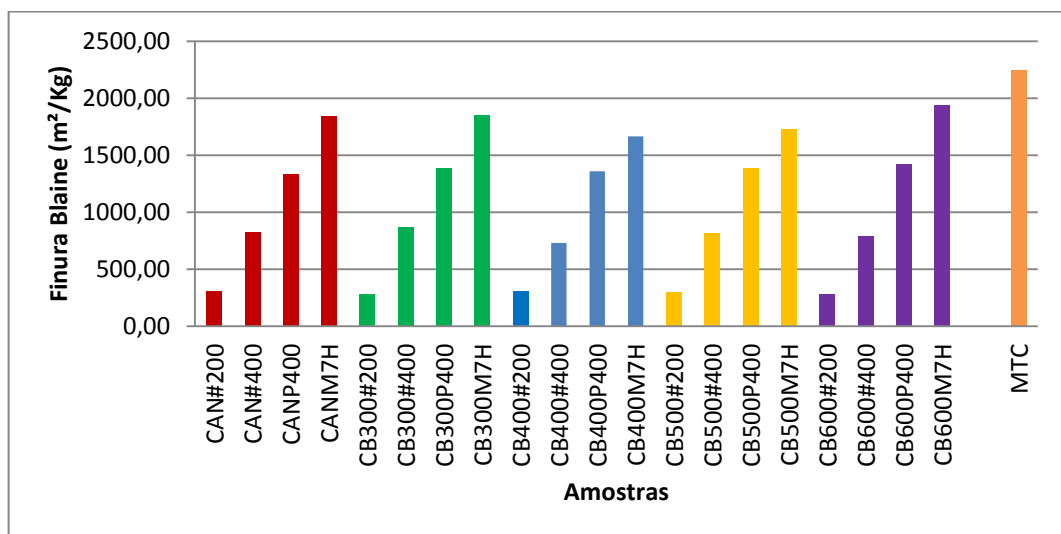
Nas Figuras 4.1 e 4.2 são ilustradas a área superficial BET e finura blaine, respectivamente das CBCA estudadas neste trabalho.

**Figura 4.1 - Área Superficial BET das CBCA.**



Fonte: O autor (2016).

**Figura 4.2 – Finura Blaine das CBCA**



Fonte: O autor (2016).

Conforme os resultados da Figura 4.1, pode-se observar que o material retido na peneira de #200 possui uma maior área específica com relação as demais amostras, com exceção da CANM7H, que de modo geral, não apresentou coerência com a definição dos níveis estabelecidos.

De acordo com os resultados da Figura 4.2, pode-se afirmar que o peneiramento / moagem foi bem sucedido, uma vez que alcançou quatro níveis de finura Blaine: material retido na peneira #200, retido na peneira #400, passante na peneira #400 e moído por 7 horas.

É possível que os ensaios de BET tenham de alguma forma falhado, pois, os resultados da ABNT NBR 5751 (2012) corroboram com os resultados obtidos pelo método de Blaine.

Rodrigues (2012), em sua pesquisa com cinza da palha da cana-de-açúcar calcinadas a 600 °C, 700 °C, 800 °C e 900 °C, observou a diminuição da superfície específica das amostras à medida que a temperatura de calcinação das cinzas era elevada.

Nas cinzas de casca de arroz (CCA) com diferentes temperaturas de queima controladas produzidas por Cordeiro (2006), o autor observou que, as cinzas calcinadas a 400 °C - menor temperatura de queima em sua pesquisa, apresentam superfície específica mais elevada quando comparadas com as de maior temperatura de calcinação, sendo o resultado atribuído pelo alto teor de carbono presente na cinza.

#### 4.1.2 Massa específica real

São apresentados na Tabela 4.2 e na Figura 4.3 os valores e ilustração da massa específica dos materiais estudados e das CBCA, respectivamente. O valor médio de massa específica real para as cinzas foi de 2,31 g/cm<sup>3</sup>. O metacaulim (MTC) e a cal hidratada (CH-I), utilizados no programa experimental, com massas específicas de 2,60 g/cm<sup>3</sup> e 2,33 g/cm<sup>3</sup>, respectivamente.

Na Figura 4.3 pode ser observado que, a massa específica das CBCA estudadas, variaram em seus valores de massa específica quando comparadas em função do tratamento de finura e de calcinação aplicadas, respectivamente.

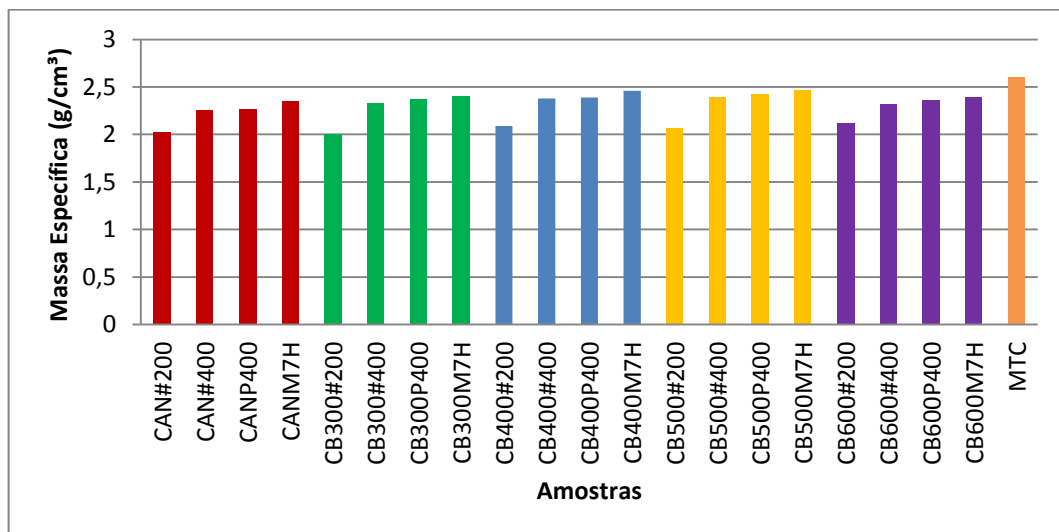
Os valores da massa específica das CBCA foi maior a mediada que maior foi o grau de finura aplicado ao material. Observa-se ainda que todas as amostras das CBCA tem uma menor massa específica quando comparado com o MTC.

Tabela 4.2 – Massa específica real das CBCA, MTC e CH-I.

Amostras	Massa específica (g/cm <sup>3</sup> )
CAN#200	2,03
CAN#400	2,26
CANP400	2,27
CANM7H	2,35
CB300#200	2,00
CB300#400	2,33
CB300P400	2,37
CB300M7H	2,41
CB400#200	2,09
CB400#400	2,38
CB400P400	2,39
CB400M7H	2,46
CB500#200	2,07
CB500#400	2,40
CB500P400	2,43
CB500M7H	2,47
CB600#200	2,12
CB600#400	2,32
CB600P400	2,36
CB600M7H	2,40
MTC	2,60
CAL – CH-I	2,33

Fonte: O autor (2016).

Figura 4.3 - Massa específica das CBCA, agrupadas por tratamento de peneiramento / moagem.



Fonte: O autor (2016).

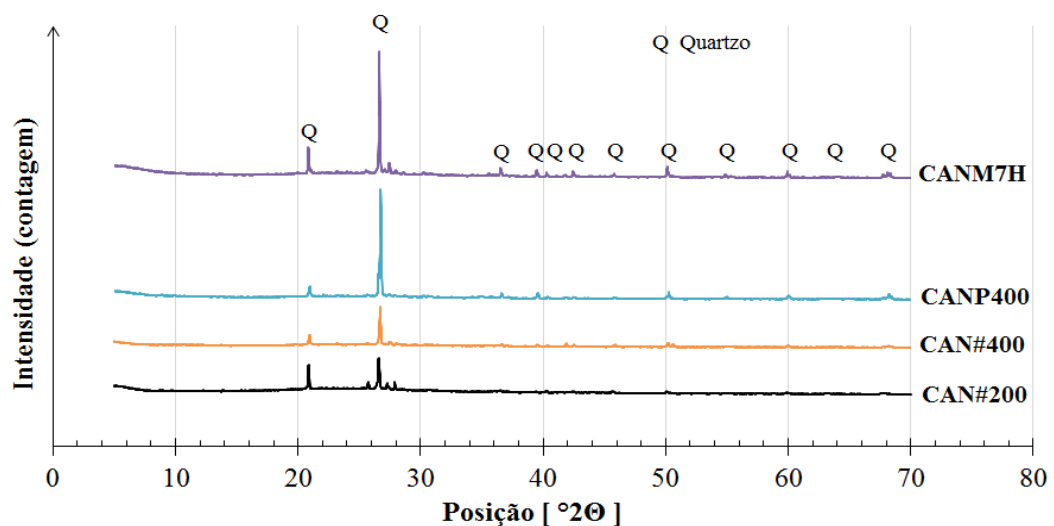
As cinzas do bagaço da cana-de-açúcar calcinada a 400, 500 e 600°C, produzidas por Cordeiro (2006), apresentaram valores de massa específica de média de 2,27 g/ cm<sup>3</sup>, valor esse próximo do encontrado para as cinzas neste trabalho. Ressalta-se ainda que a massa específica real está intimamente relacionada com a porosidade interna das partículas da cinza (CASTRO e PANDOLFELLI, 2009 apud RODRIGUES, 2012).

#### 4.1.3 Análise de difração de raios-X nas cinzas

As análises de difração de raios-X das amostras de cinzas são ilustradas nas Figuras 4.4, 4.5, 4.6, 4.7, 4.8, que apresentam as CBCA sem calcinação e calcinadas a 300, 400, 500 e 600°C, respectivamente. Observa-se que as cinzas apresentam as mesmas fases cristalinas, sendo característico o seu pico na posição  $2\theta = 26,64^\circ$ , com elevada intensidade, o que caracteriza a cristalinidade das amostras.

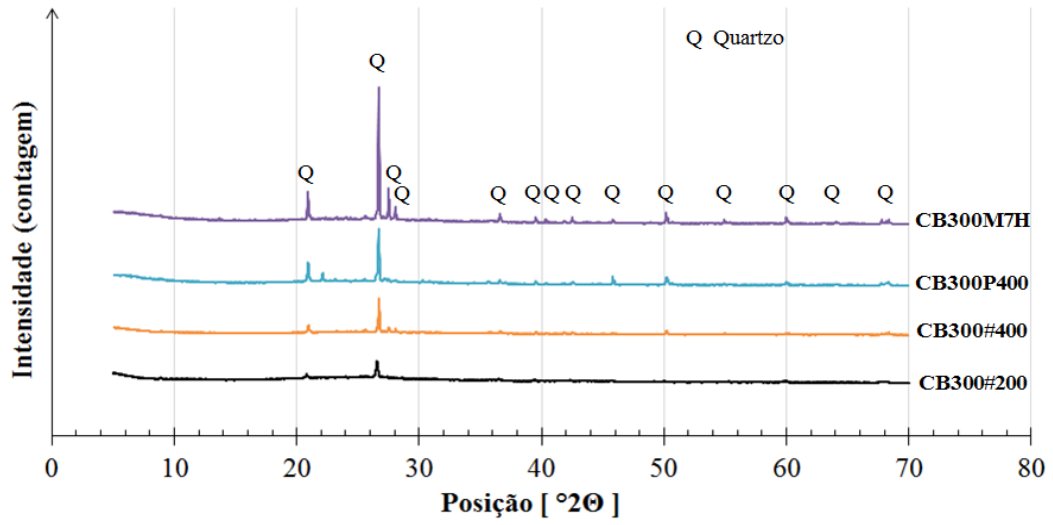
A elevada intensidade dos picos de quartzo da CBCA alterada pela presença da areia, provavelmente, encobriu a presença de um possível halo amorfo nas análises de DRX.

**Figura 4.4 – Difração de raios X da CBCA sem calcinação.**



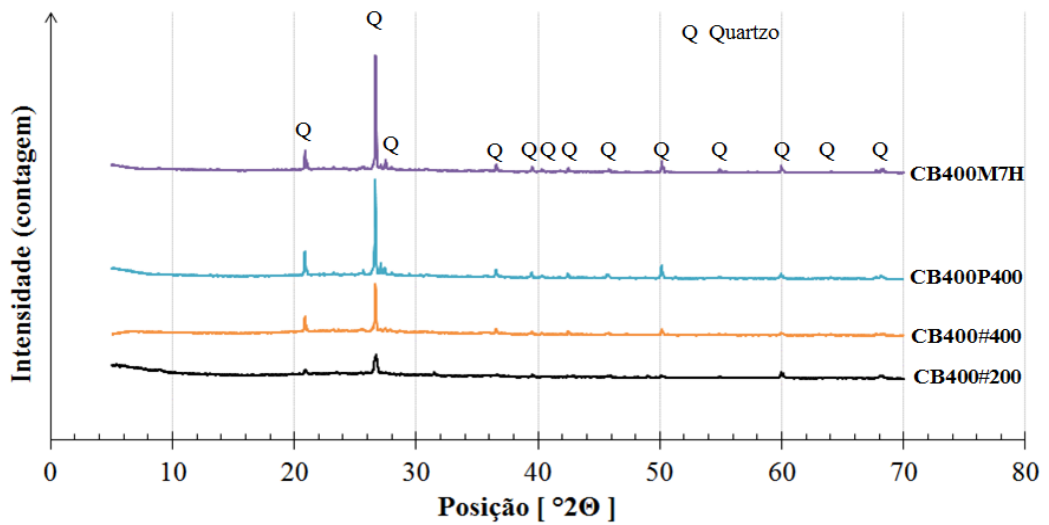
Fonte: O autor (2016).

Figura 4.5 - Difração de raios X da CBCA calcinadas a 300°C.



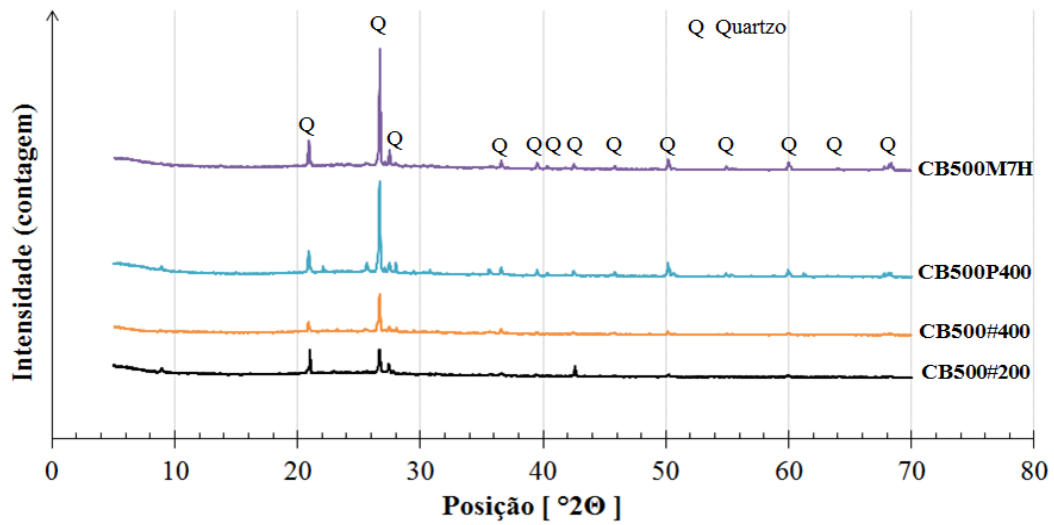
Fonte: O autor (2016).

Figura 4.6 - Difração de raios X da CBCA calcinadas a 400°C



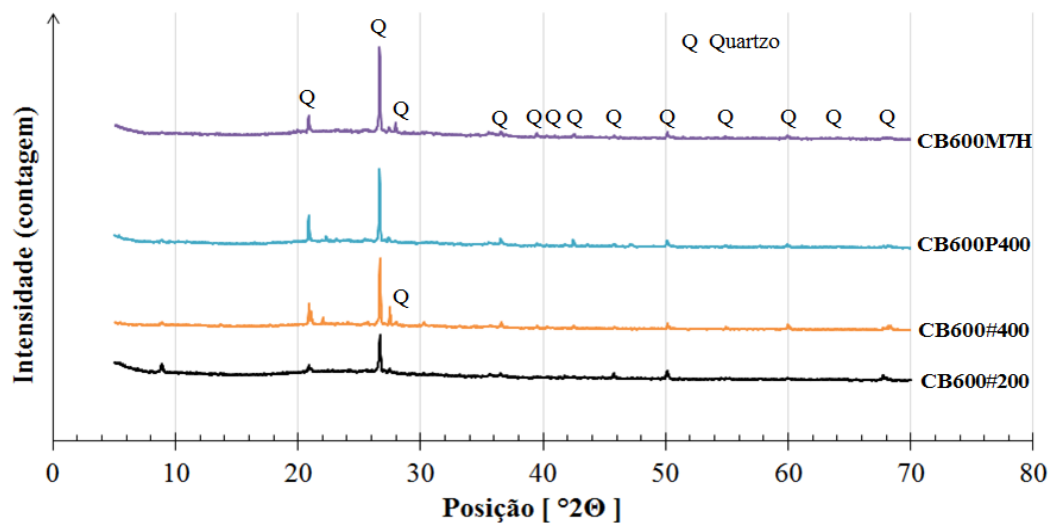
Fonte: O autor (2016).

Figura 4.7 - Difração de raios X da CBCA calcinadas a 500°C



Fonte: O autor (2016).

Figura 4.8 - Difração de raios X da CBCA calcinadas a 600°C



Fonte: O autor (2016).

Segundo Rodrigues (2012), essa cristalização pode ser atribuída ao longo período de permanência das cinzas na mufla, devido à inércia térmica do forno ao ser desligado, da calcinação de uma amostra para outras. Quanto maior a temperatura de calcinação das cinzas, maior a tendência de cristalização (FRÍAS *et al.*, 2007; VILLAR-COCIÑA *et al.*, 2008, CORDEIRO *et al.*, 2009; RODRIGUES, 2012; VASCONCELOS, 2013).

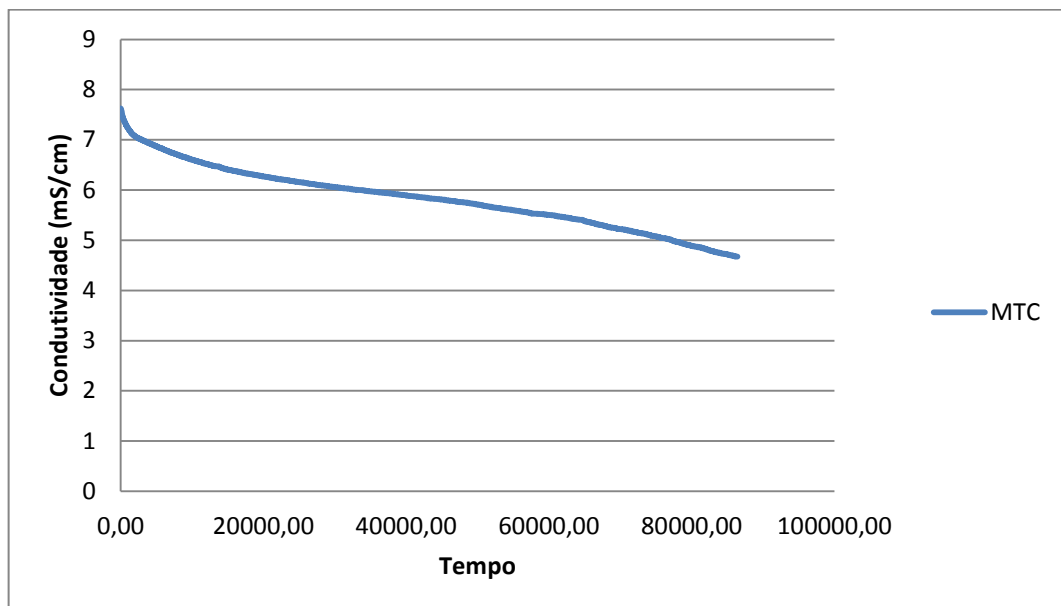
Os resultados do índice de pozolanicidade com cal não corroboram para esta conclusão. Em estudo realizado por Feitosa *et al.* (2012) apud Vasconcelos (2013), é afirmado

pelos autores que a moagem pode intensificar os picos, uma vez que tal comportamento é associado ao aumento do estado de aglomeração das partículas. Observam-se também pelas figuras que o aumento da temperatura de calcinação provocou o aumento da cristalinidade das CBCA.

#### 4.2 Avaliação da atividade pozolânica das CBCA por condutividade elétrica

Para a avaliação da reatividade das CBCA, neste trabalho foi relacionado a variação da condutividade elétrica do sistema CH/cinza, como proposto por Luxán et al. (1989). Segundo Rodrigues (2012), com a formação de produtos insolúveis de C-S-H, há dessa forma, uma menor quantidade de íons de  $\text{Ca}^{2+}$ , acarretando conseqüentemente no decréscimo da condutividade elétrica. As Figuras de 4.9 a 4.18 ilustram as curvas de perda de condutividade elétrica do MTC, das CBCA por tratamento de calcinação e por grau de finura, respectivamente.

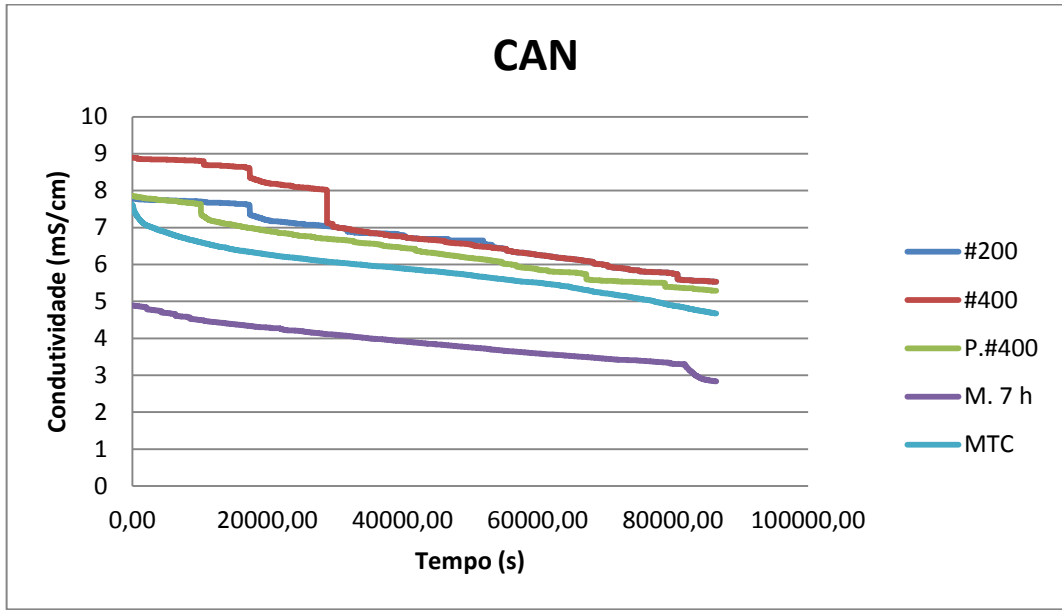
**Figura 4.9 – Condutividade elétrica versus tempo de CH / MTC.**



Fonte: O autor (2016).

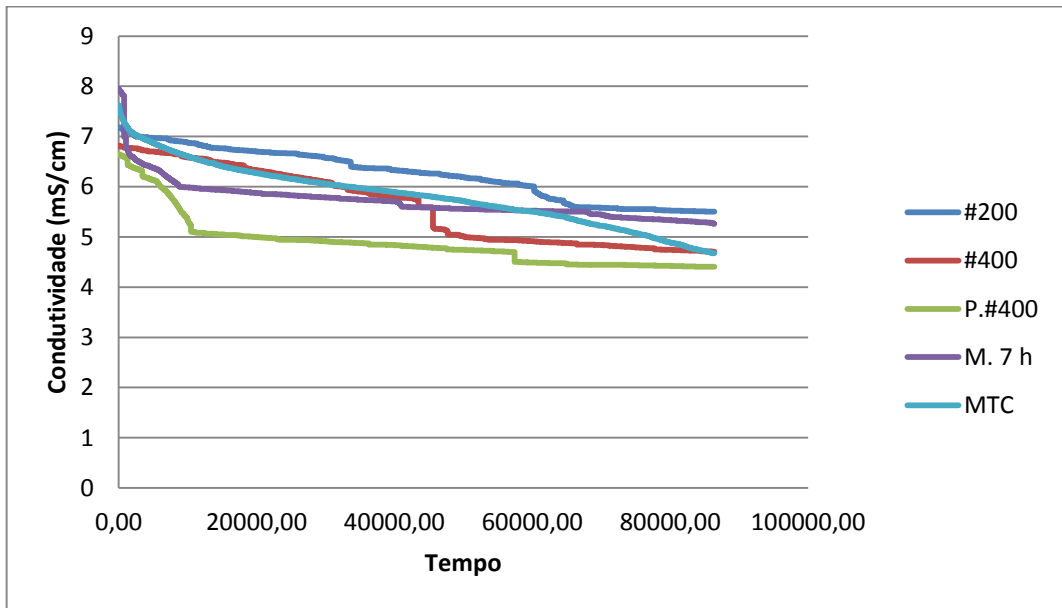


Figura 4.10 - Condutividade elétrica versus tempo de CH / CAN.



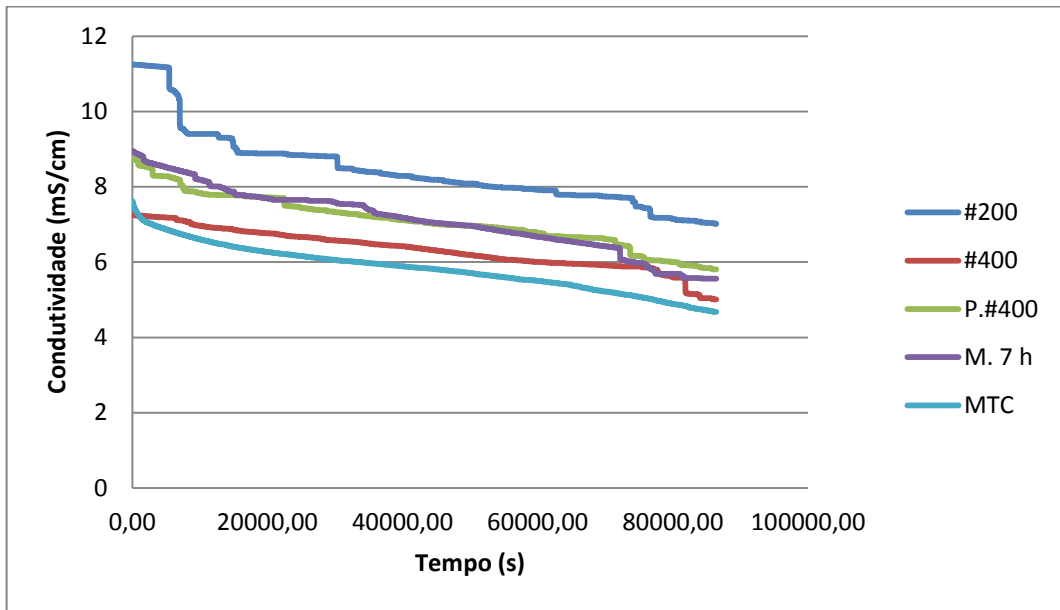
Fonte: O autor (2016).

Figura 4.11 - Condutividade elétrica versus tempo de CH / CB300.



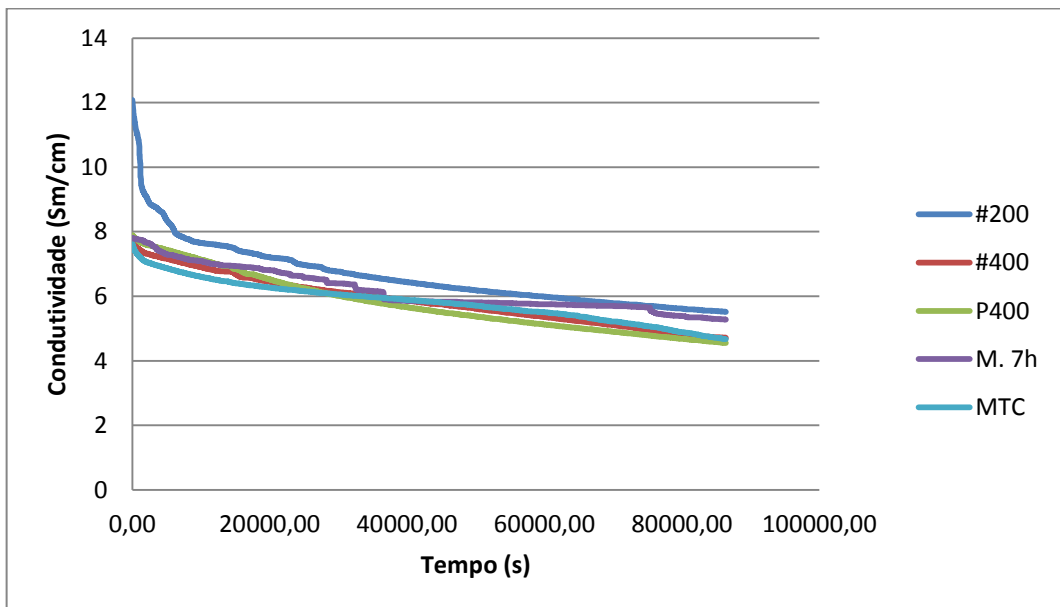
Fonte: O autor (2016).

**Figura 4.12 - Condutividade elétrica versus tempo de CH / CB400.**



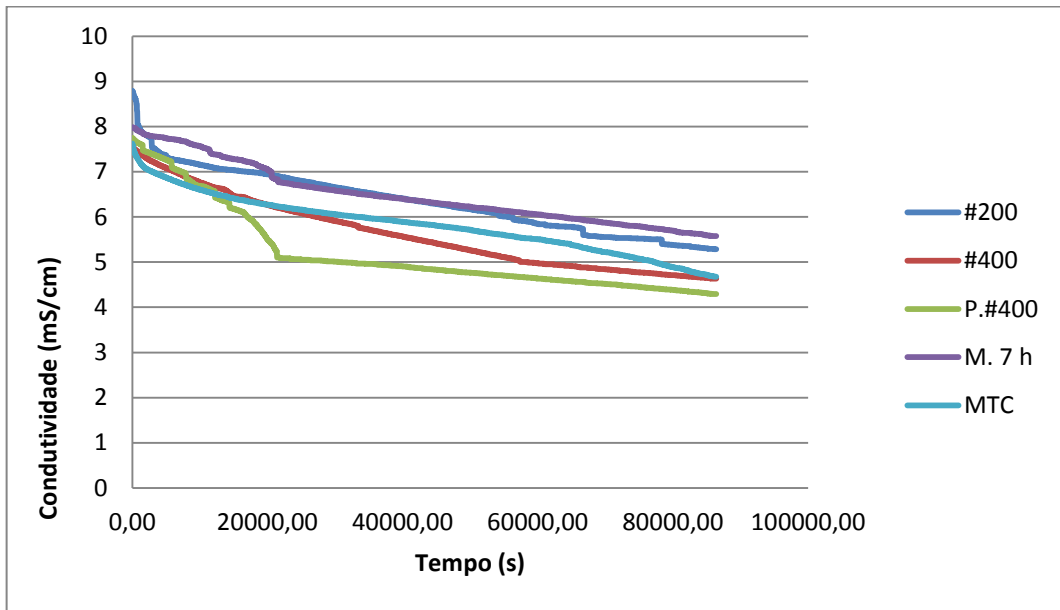
Fonte: O autor (2016).

**Figura 4.13 - Condutividade elétrica versus tempo de CH / CB500.**



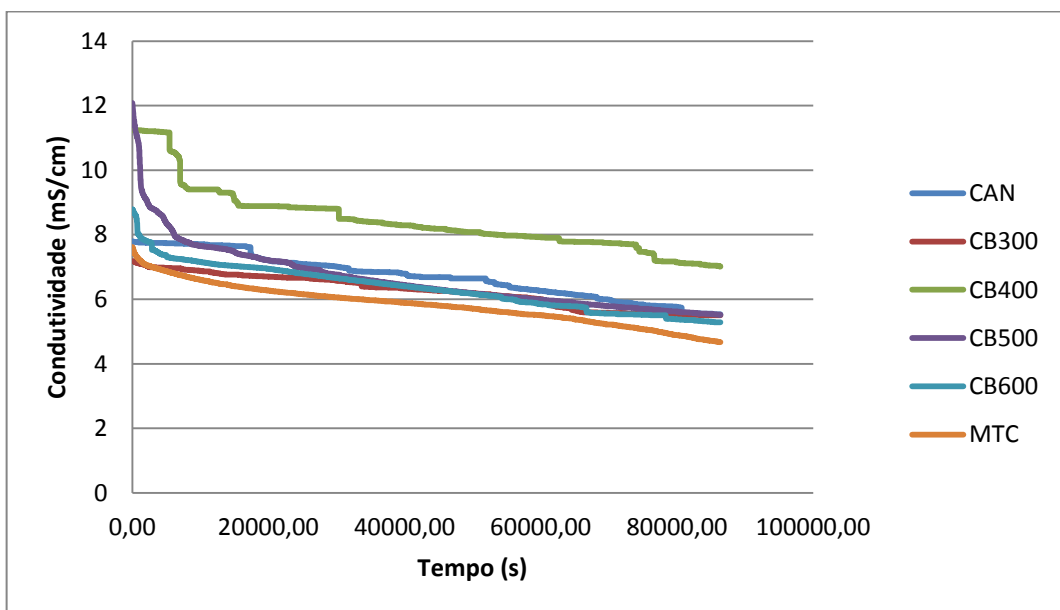
Fonte: O autor (2016).

**Figura 4.14 - Condutividade elétrica versus tempo de CH / CB600.**



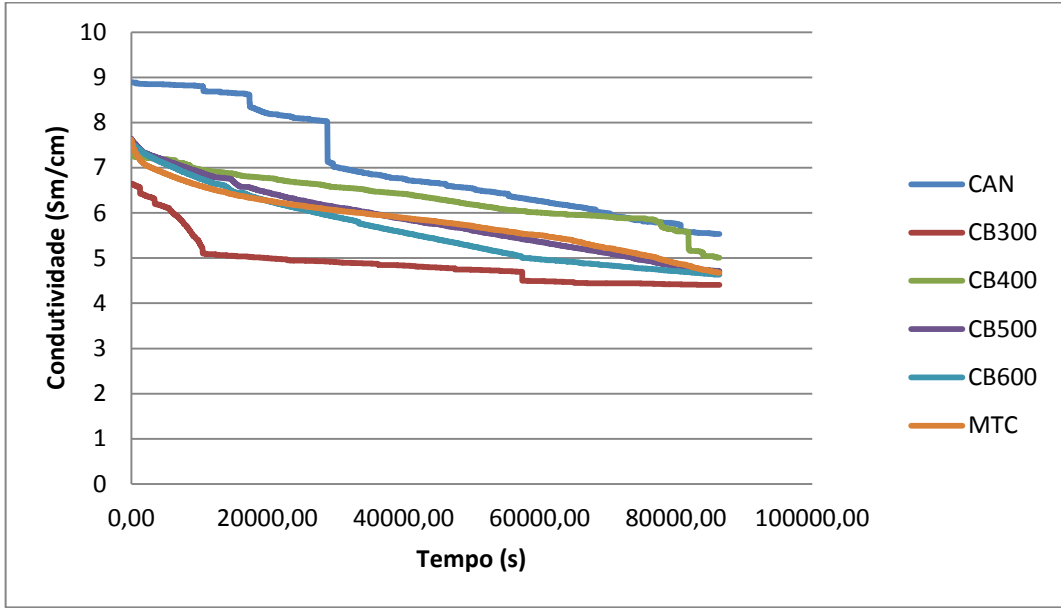
Fonte: O autor (2016).

**Figura 4.15 - Condutividade elétrica versus tempo de CH / #200.**



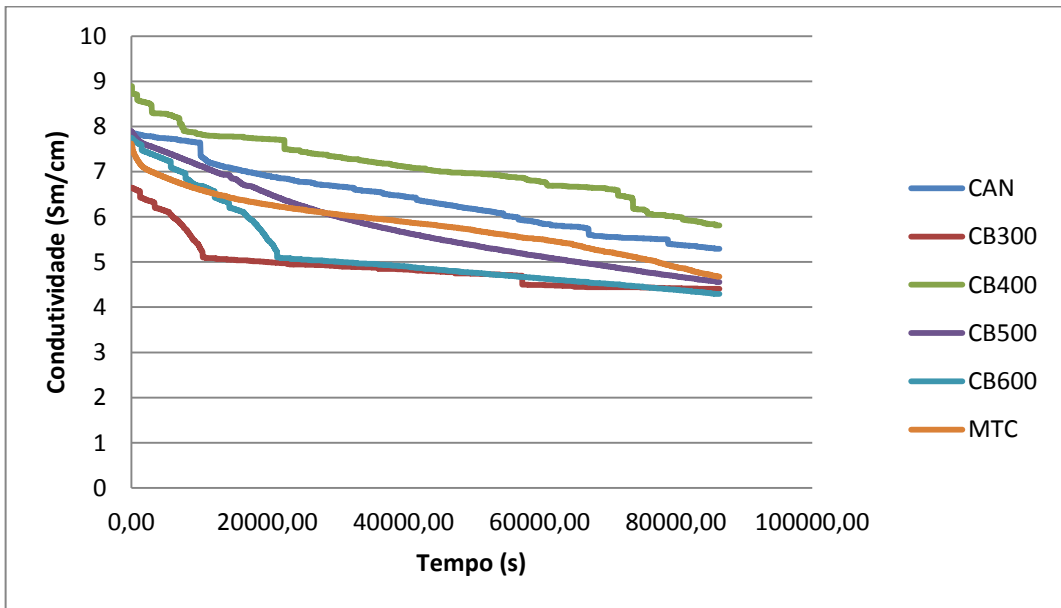
Fonte: O autor (2016).

**Figura 4.16 - Condutividade elétrica versus tempo de CH / #400.**



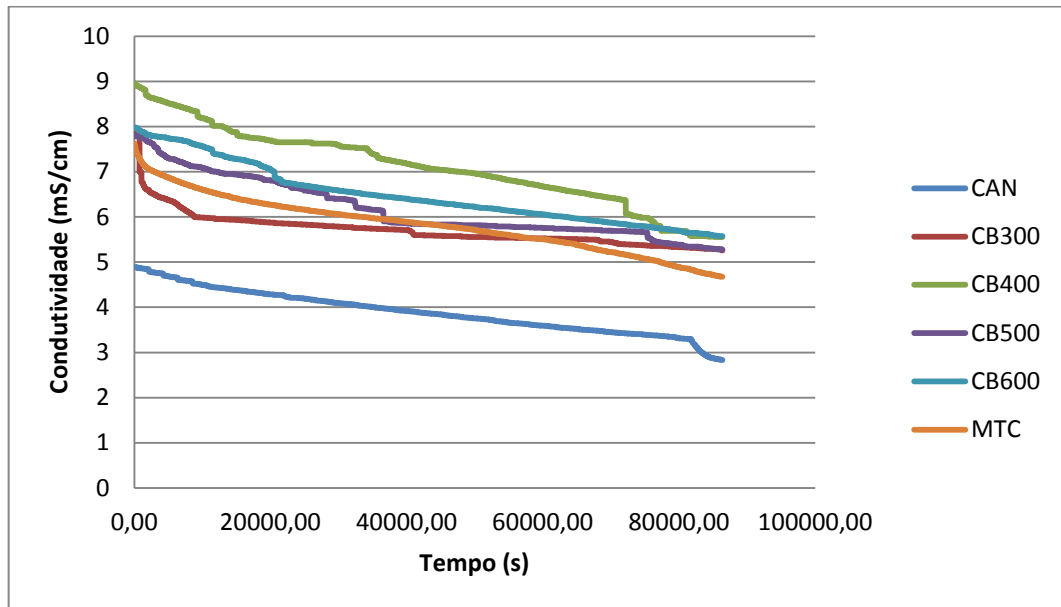
Fonte: O autor (2016).

**Figura 4.17 - Condutividade elétrica versus tempo de CH / P400.**



Fonte: O autor (2016).

**Figura 4.18 - Condutividade elétrica versus tempo de CH / M7H.**



Fonte: O autor (2016).

Na Tabela 4.3, são apresentados os valores da condutividade elétrica dos sistemas CH/cinza em função do tempo e sua variação total em função dos beneficiamentos aplicados nesta pesquisa.

**Tabela 4.3 – Valores de condutividade elétrica dos sistemas CH/cinza para os períodos de avaliação de 120 s, 10000 s, 85000 s e variação da condutividade total das CBCA.**

Amostras / Tempo	120 s	10000 s	85000 s	Varição da Condutividade entre 120 e 10000 s	Varição da Condutividade entre 120 e 85000 s
	Condutividade Elétrica em (mS/cm)			$\Delta$ (mS/cm)	
<b>CAN#200</b>	7,79400	7,70499	5,55099	0,08901	2,24301
<b>CAN#400</b>	8,89400	8,80499	5,55098	0,08901	3,34302
<b>CANP400</b>	7,85099	7,64300	5,31500	0,20799	2,53599
<b>CANM7H</b>	4,88700	4,50199	2,87500	0,38501	2,01200
<b>CB300#200</b>	7,17899	6,88000	5,50700	0,29899	1,67199
<b>CB300#400</b>	6,80700	6,59000	4,71400	0,28000	2,15600
<b>CB300P400</b>	6,63899	5,34100	4,40899	1,29799	2,23000
<b>CB300M7H</b>	7,90000	5,98799	5,29199	1,91201	2,60801
<b>CB400#200</b>	11,24800	9,40000	7,04700	1,84800	4,20100
<b>CB400#400</b>	7,24800	6,96799	5,04300	0,28001	2,20500
<b>CB400P400</b>	8,72100	7,82800	5,84000	0,89300	2,88100
<b>CB400M7H</b>	8,94500	8,18600	5,55999	0,75900	3,38501
<b>CB500#200</b>	11,84200	7,65000	5,54349	4,19200	6,29851

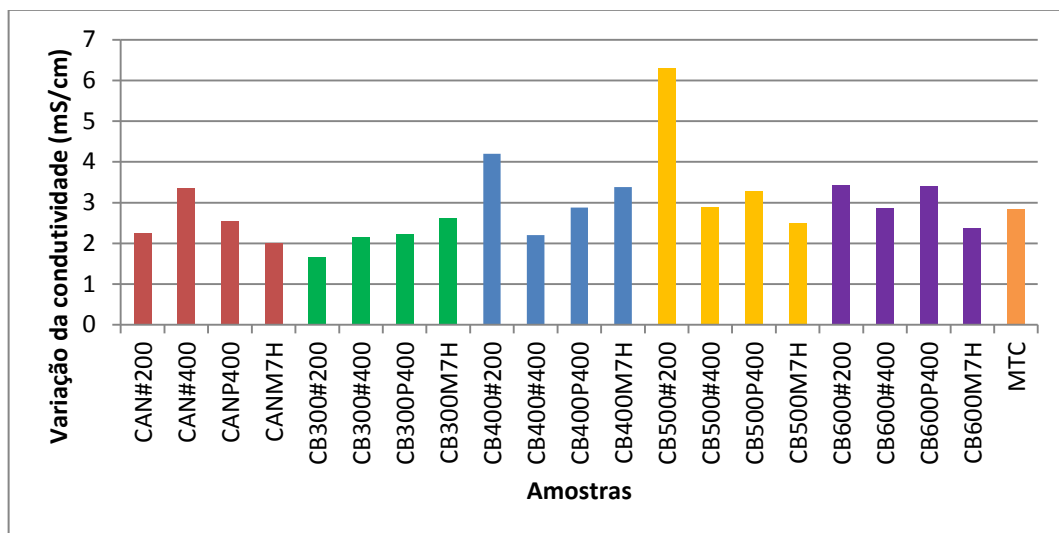
<b>CB500#400</b>	7,60799	6,90700	4,72700	0,70099	2,88099
<b>CB500P400</b>	7,86600	7,13600	4,58300	0,73000	3,28300
<b>CB500M7H</b>	7,80099	7,08799	5,30100	0,71300	2,49999
<b>CB600#200</b>	8,74199	7,15899	5,31500	1,58300	3,42699
<b>CB600#400</b>	7,52699	6,76000	4,65500	0,76699	2,87199
<b>CB600P400</b>	7,73299	6,69000	4,32100	1,04299	3,41199
<b>CB600M7H</b>	7,97600	7,56799	5,61000	0,40801	2,36600
<b>MTC</b>	<b>7,55700</b>	<b>6,60500</b>	<b>4,71600</b>	<b>0,95200</b>	<b>2,84100</b>

Fonte: Produzido pelo autor.

Nos primeiros 120 s, observa-se que a perda de condutividade elétrica das cinzas foi menor, quando comparado aos 10000s, sendo o resultado coerente, haja vista que nesse período inicial as cinzas estão no processo de dissolução. Após 10000 s, todas as soluções CH/Cinza apresentaram os maiores valores de perda de condutividade elétrica, como observado nas Figuras 4.9 a 4.18 e na Tabela 4.3, onde esse comportamento se estende até o final do experimento.

Na Figura 4.19, é ilustrada a variação da condutividade elétrica entre 120 e 85000 s das cinzas estudadas e do MTC – Pozolâna de referência.

**Figura 4.19 – Variação da Condutividade elétrica entre 120 e 85000 s das CBCA e do MTC.**



Fonte: Produzido pelo autor.

Tanto nos trabalhos de Luxán *et al.* (1989) quanto de Payá *et al.* (2001), os tempos de medição da condutividade elétrica foram respectivamente de apenas 120 s e 10000 s. O período de análise para as conclusões a respeito do material foram o suficiente. No presente

trabalho foi adotada uma análise de 85000 s, visto que as cinzas continuaram perdendo condutividade elétrica mesmo após o período de 10000 s.

Villar Cociña (2005) relata que a possível formação de C-S-H, além de outros produtos de hidratação se dá decorrente a diminuição da condutividade elétrica na solução. De modo geral após o período de 15 h de análise 54000 s, observou-se que a perda de condutividade elétrica aumentou consideravelmente em todas as cinzas estudadas. Os resultados do ensaio de condutividade mostraram que, nas primeiras horas, as soluções de CH/CB300M7H, CH/CB400#200, CH/CB500#200, CH/CB600#200 e CH/CB600P400 tiveram as maiores perdas de condutividade elétrica, indicando uma maior reatividade.

Na Tabela 4.4, é apresentado a avaliação da atividade pozolânica por medida de condutividade elétrica proposto por Luxán *et al* (1989).

**Tabela 4.4 – Avaliação da atividade pozolânica por medida de condutividade elétrica.**

<b>Classificação do material</b>	<b>Variação da condutividade de acordo com o método proposto (mS/cm)</b>
<b>Não pozolâna</b>	Menor que 0,40
<b>Pozolâna variável</b>	Entre 0,4 e 1,2
<b>Boa pozolâna</b>	Maior que 1,2

Fonte: Luxán *et al* (1989).

Pela classificação da Tabela 4.4, tem-se que todas as cinzas produzidas são classificadas como boa pozolana, porém, vale ressaltar que no presente trabalho foram feitas algumas adequações quanto ao método proposto por Luxán *et al* (1989).

Para a avaliação das cinzas, quando comparadas com a pozolana de referência (MTC), observou-se que as perdas de condutividade são próximas ou superiores, com exceção do CB300#200, mostrando que as cinzas são ao menos reativas, como constatado na Tabela 4.3.

Ao analisar as curvas das soluções avaliadas constatou-se que não houve estabilização dos dados, sendo necessário, portanto, um tempo maior de avaliação para que se possa obter maiores conclusões acerca das cinzas estudadas.

### 4.3 ABNT NBR 5751 (2012)

Na tabela 4.5, são apresentados os resultados dos ensaios da norma ABNT NBR 5751 (2012) para a CBCA com diferentes tratamentos e do MTC - pozolana de referência.

De acordo com os resultados, observa-se que o MTC alcançou mais do que o dobro da resistência mecânica à compressão prevista pela ABNT NBR 5751 (2012) que é de (6,0 MPa), mesmo apresentando uma relação água/aglomerante superior em relação as demais misturas, confirmando assim seu excelente potencial como adição.

**Tabela 4.5 - Quadro resumo das propriedades das argamassas de cal hidratada com metacaulim e cinza do bagaço de cana-de-açúcar. Moldagem de 3 corpos-de-prova.**

Mistura	Ca(OH) <sub>2</sub> (g)	MTC / CBCA (g)	Areia (g)	Água (g)	Consist. média (mm)	a/agl	Adit. (%)	Resist. Comp. (MPa)	IAC (%)
<b>MTC</b>	104,00	232,45	936,00	309,53	220,00	0,92	0,8	<b>13,17</b>	<b>221,28</b>
<b>CAN#200</b>	104,00	181,38	936,00	199,77	211,50	0,7	0,2	0,28	4,67
<b>CAN#400</b>		202,08		214,93	209,00			0,62	10,33
<b>CANP400</b>		203,05		214,26	201,25			0,70	11,67
<b>CANM7H</b>		209,45		219,41	190,25			<b>7,97</b>	<b>132,84</b>
<b>CB300#200</b>	104,00	178,15	936,00	197,51	229,75	0,7	0,2	0,42	7,00
<b>CB300#400</b>		207,76		218,23	222,25			1,42	23,67
<b>CB300P400</b>		211,50		220,85	188,50			1,89	31,50
<b>CB300M7H</b>		215,00		223,3	180,00			<b>9,52</b>	<b>158,67</b>
<b>CB400#200</b>	104,00	186,84	936,00	203,59	200,00	0,7	0,2	0,38	6,33
<b>CB400#400</b>		212,62		221,64	178,50			1,42	23,67
<b>CB400P400</b>		212,94		221,86	186,75			1,56	26,00
<b>CB400M7H</b>		219,63		226,54	236,50			<b>7,03</b>	<b>117,17</b>
<b>CB500#200</b>	104,00	184,93	936,00	202,25	214,50	0,7	0,2	0,24	4,00
<b>CB500#400</b>		214,09		222,67	179,50			1,58	26,33
<b>CB500P400</b>		216,70		224,49	180,32			1,60	26,67
<b>CB500M7H</b>		220,37		227,06	193,50			<b>9,52</b>	<b>158,67</b>
<b>CB600#200</b>	104,00	189,29	936,00	205,30	222,50	0,7	0,2	0,24	4,00
<b>CB600#400</b>		206,96		217,68	205,25			0,75	12,50
<b>CB600P400</b>		210,83		220,38	187,00			1,53	25,50
<b>CB600M7H</b>		213,96		222,57	181,75			<b>6,79</b>	<b>113,17</b>

Fonte: O autor (2016).

O IAC da maioria dos diferentes tipos de cinzas, ficaram muito abaixo do estabelecido pela norma ABNT NBR 5751 (2012), sobressaindo-se apenas as cinzas moídas



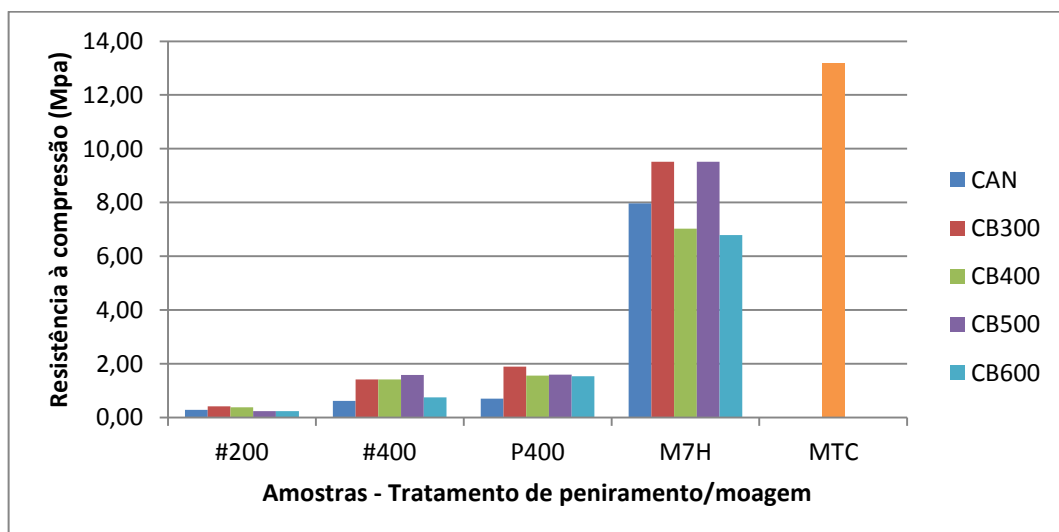
por 7 horas obtendo resistência à compressão superior a 6,0 MPa, evidenciando assim que, as cinzas com maior grau de moagem apresentaram melhores resultados.

Os resultados obtidos nos ensaios com cal hidratada indicam a pozolanicidade para as cinzas moídas por 7 horas e a não pozolanicidade do restante das CBCA estudadas. Evidencia-se que a consistência abaixo de exigido pela norma devido à padronização da relação água/aglomerante influenciou os resultados da CBCA sem moagem, independentemente da temperatura de calcinação.

Para os resultados abaixo do exigido pela NBR 12653:1992 que é de (6,0 MPa), é importante salientar que, neste ensaio específico a resistência obtida pode ser atribuída predominantemente ao efeito pozolânico, uma vez que o ganho de resistência só é possível mediante a formação de produtos hidratados resistentes e que, o efeito fíler tem contribuição na resistência mecânica por meio do aumento da compactidade e, principalmente, pela colmatação dos poros em razão do efeito de nucleação de produtos hidratados sobre as partículas de menores dimensões. Vale ressaltar que no método proposto pela ABNT NBR 5751 (2012), a formação de produtos hidratados advém da reação entre a cal hidratada e o material testado, assim observa-se a existência da reação pozolânica, porém não o bastante para satisfazer o exigido pela normatização (VASCONCELOS, 2013).

Nas figuras 4.20 e 4.21 é ilustrado o ganho de resistência à compressão em (MPa) das CBCA e do MTC, em função do tratamento de peneiramento/moagem e calcinação, respectivamente, aplicada nas CBCA.

**Figura 4.20 – Resistência à compressão em (Mpa) das CBCA e do MTC em função do tratamento de peneiramento / moagem.**



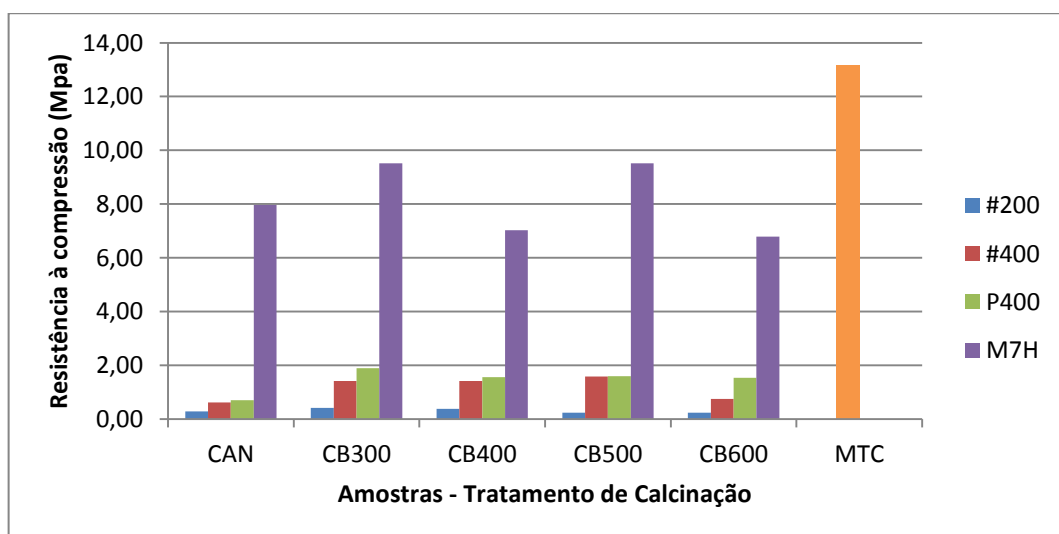
Fonte: O autor (2016).

A redução das partículas da CBCA por peneiramento e moagem gerou ganhos de resistência mecânica nos corpos de provas produzidos, como observado na figura 4.20, sendo tal comportamento já era esperado, uma vez que as partículas menores são mais reativas. Os resultados do IAC corroboram para fundamentar que a moagem é essencial para o material pozolânico, haja vista que a influência tanto no efeito fíler como na atividade pozolânica verificada na ABNT ABNT NBR 5751 (2012).

Observa-se que, a moagem teve efeito característico de melhorar o IAC nas temperaturas de calcinação à 300 e 500°C de forma mais significativa do que quando comparado com as cinzas sem calcinação e calcinadas em temperaturas de 400°C e 600°C. Partindo desta afirmação, a redução das partículas da CBCA por moagem contribui de forma significativa no ganho de resistência mecânica nos corpos de provas produzidos com cal hidratada. Entretanto, vale ressaltar que todas as cinzas sem e com tratamento térmico o IAC foi praticamente mantido para os graus de finura, sobressaindo-se as cinzas moídas por 7h.

Para os resultados da CBCA quando comparados em função do tratamento de calcinação, conforme ilustrado na figura 4.21, define claramente que os níveis de calcinação utilizados neste trabalho não foram satisfatórios em melhorar a atividade pozolânica da CBCA, sendo observado que para a temperatura de 600°C houve diminuição da resistência à compressão para dotas as amostras em função da finura.

**Figura 4.21 - Resistência à compressão em (Mpa) das CBCA e do MTC em função do tratamento de Calcinação.**



Fonte: Produzido pelo autor.

De uma forma, há uma tendência da redução da IAC com o aumento da temperatura de calcinação, sendo a temperatura de 600°C a com piores resultados. Evidência a formação de sílica cristalina diante de altas temperaturas, reduzindo assim a reatividade de cinza. Tal comportamento não foi observado quando comparado a CB500 com a CB400. A correlação entre a resistência à compressão prevista na ABNT ABNT NBR 5751 (2012) e a temperatura de calcinação, permite afirmar que o efeito deste tratamento pouco teve influência no IAC, sendo assim o tratamento de finura de maior relevância.

## 5 CONCLUSÕES

Os resultados tanto das propriedades físicas, químicas quanto da microestrutura foram de suma importância para o entendimento da CBCA quanto ao seu potencial pozolânico.

Os diferentes graus de peneiramento / moagem utilizados nesta pesquisa permitiram que a análise distinguisse de forma satisfatória os efeitos da diminuição do tamanho de partículas. Concluindo-se que o efeito da moagem teve impacto positivo na melhoria da atividade pozolânica da CBCA. O efeito da temperatura de calcinação, dentro dos limites deste trabalho, pouco influenciou.

A análise por difração de raios-X (DRX) teve grande importância na análise, apesar de prejudicada pela presença de areia oriunda do processo de lavagem da cana-de-açúcar, onde provavelmente encobriu a presença de um possível halo amorfo nas análises de DRX. Dessa análise o principal elemento identificado na DRX da CBCA foi o quartzo, sendo característico o seu pico na posição  $2\theta = 26,64^\circ$ . Analisando a intensidade dos principais picos detectados na DRX foi possível concluir que a moagem provocou o aumento da intensidade dos picos principais do quartzo, o que poderia levar à conclusão do aumento da cristalinidade e, conseqüentemente, diminuição da amorficidade. No entanto, os resultados do (IAC) não corroboram para esta conclusão, atribuindo-se este efeito ao aumento do estado de aglomeração das partículas (FEITOSA et al., 2006 apud VASCONCELOS, 2013).

Na análise do efeito da temperatura de calcinação, a DRX deixou evidente a pouca influência neste trabalho. Ambos os tratamentos provocaram o aumento da cristalinidade da CBCA, comportamento este associado ao aumento da intensidade (DRX) do pico principal do quartzo cristalino. De acordo com os resultados obtidos, este trabalho contribui para indicar que a temperatura de calcinação da CBCA deve limitar-se à  $500^\circ\text{C}$ .

O índice de atividade pozolânica com cal hidratada (IAC) das amostras de CBCA ficaram bem abaixo do valor de 6,0 MPa para a maioria das amostras como estabelecido pela ABNT NBR 5751 (2012), com exceção das cinzas moídas por 7 horas, que obtiveram resistência superior à exigida pela norma, independente da temperatura de queima. Os melhores resultados foram obtidos com a CBCA calcinada a 300 e  $500^\circ\text{C}$ .

Diante dos resultados obtidos é possível concluir que a grande parte das CBCA tem uma reatividade reduzida quando comparadas ao metacaulim, mesmo assim, os ensaios da

ABNT NBR 5751 (2012) demonstraram que dependendo do tipo de tratamento que a CBCA recebe ela pode ser utilizada como adição pozolânica, pois existe reatividade, assim como corroborado com a técnica por condutividade elétrica. Contudo, para que a CBCA possa ser comercializada como adição para cimento Portland é necessário que as usinas tenham um maior controle da temperatura de queima do bagaço dentro das caldeiras, para que a cinza seja reativa, como também é necessário reduzir sua granulometria através de moagem.

O método da condutividade elétrica se mostrou uma técnica rápida e útil para comparar o grau de reatividade entre as CBCA e o MTC em sistema com hidróxido de cálcio.

A avaliação pozolânica, efetuada por meio da medição da condutividade elétrica em soluções CH/cinzas, mostrou que as cinzas apresentam em sua maioria uma baixa reatividade nas primeiras 3 h, quando comparado com o MTC. Ao final do ensaio em 24 h todas as cinzas em termos de reatividade se equiparam a perda de condutividade da pozolâna de referência, corroborando que a reatividade ocorre de forma lenta.

Dessa maneira se faz necessário avaliar a pozolanicidade de cinzas períodos superiores a 24 h, com o intuito de avaliar o tempo necessário para a estabilização da perda da condutividade, bem como a avaliação da cinza em água deionizada, sem hidróxido de cálcio, afim de identificar a influência dos íons gerados pela cinza.

É importante lembrar que, todos os dados apresentados neste trabalho referem-se apenas as amostras coletadas que passaram, ou não, por diferentes tratamentos térmicos e físicos. Para se chegar a dados mais conclusivos, é necessário o aprofundamento deste estudo com ensaios químicos e termogravimétricos. Através destes novos ensaios será possível averiguar o percentual de sílica reativa e CO<sub>2</sub> presente na CBCA analisada apenas por ensaios físicos.

## 6 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

- Maior abordagem quanto a moabilidade da cinza do bagaço de cana-de-açúcar (CBCA), bem como o avaliar diferentes tempos de moagem.
- Determinar o consumo de hidróxido de cálcio pelas reações pozolânicas por meio de análise termogravimétrica e identificação do C-S-H como produto de hidratação utilizando a termogravimétrie, microscópio eletrônico de varredura e DRX.
- Avaliar a pozolanicidade de cinzas oriundas da queima de resíduos agroindustriais pelo método de condutividade elétrica, para períodos superiores à 24 h, pois a reatividade ocorre de forma lenta.
- Avaliar o comportamento das cinzas em água deionizada, sem o hidróxido de cálcio com a finalidade de conhecer a contribuição dos íons gerados pela cinza na condutividade do sistema CH/cinza.
- Avaliar a influência dos íons liberados pela cinza no ensaio de condutividade elétrica.

## REFERÊNCIAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 12653**: Materiais pozolânicos – Especificação. Rio de Janeiro, 1992.

\_\_\_\_\_. **NBR 5752**: Materiais pozolânicos - Determinação de atividade pozolânica com cimento Portland - Índice de atividade pozolânica com cimento. Rio de Janeiro, 1992.

\_\_\_\_\_. **NBR 5753**: Cimento Portland pozolânico - Determinação da pozolanicidade. Rio de Janeiro, 1992.

\_\_\_\_\_. **NBR 7215**: Cimento Portland - Determinação da resistência à compressão. Rio de Janeiro, 1996.

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

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

\_\_\_\_\_. **NBR 5751**: Materiais pozolânicos - Determinação de atividade pozolânica - Índice de atividade pozolânica com cal. Rio de Janeiro, 2012.

CALDAS, A.; MELO NETO, A. A.; PIRES SOBRINHO, C. W. A.; JOHN, V. M. O uso de cinzas residuais para produção de novos materiais e componentes construtivos. In: II Congresso Internacional de Tecnologia e Gestão da Qualidade na Construção Civil, 2000, Recife-PE.

CORDEIRO, G.C. **Utilização de cinzas ultrafinas do bagaço de cana-de-açúcar e da casca de arroz como aditivos minerais em concreto**. Tese de Doutorado. COPPE/Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2006.

CORDEIRO, L.N. **Análise da variação do índice de amorficidade da cinza da casca do arroz sobre a atividade pozolânica.** Tese de Doutorado. Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2009.

DANTAS FILHO, P.L. **Análise de custos na geração de energia com bagaço de cana-de-açúcar: um estudo de caso em quatro usinas de São Paulo.** Dissertação (Mestrado em Energia). Universidade de São Paulo, São Paulo, 175 p, 2009.

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

FRÍAS, M.; VILLAR-COCIÑA, E.; VALENCIA-MORALES, E. Characterisation of sugar cane straw waste as pozzolanic material for construction: calcining temperature and kinetic parameters. **Waste Management**, v.27, p.533-538, 2007.

GAVA, G.P. **Estudo comparativo de diferentes metodologias para a avaliação da atividade pozolânica.** Dissertação (Mestrado em Engenharia). Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 118 p, 1999.

ISAIA, G.C. O Concreto: da era Clássica à Contemporânea. In: **Concreto. Ensino, Pesquisa e Realizações.** Geraldo C. Isaia (Editor). IBRACON, p. 1-43, 2005.

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

KIHARA, Y.; CENTURIONE, S. L. **O Cimento Portland.** – (Associação Brasileira de Cimento Portland). In: **CONCRETO: Ensino, Pesquisa e Realizações** / ed. ISAIA, G. C. IBRACON – São Paulo, 2005, V1.

LUXAN, N.P.; XADRUGA, F.; SAAVEDRA, J. Rapid evaluation of pozzolanic activity of natural products by conductivity measurement. **Cement and concrete research**, v.19, 1989.



MASSAZZA, F. Pozzolana and Pozzolanitic Cements. In: Hewlett, P.C. (ed.), **Lea's Chemistry of Cement and Concrete**, 4<sup>th</sup> edition, Arnold Publishers londos, pp. 485-500, 1998.

MEHTA, P. K.; MONTEIRO, P. J. M. **Concreto: microestrutura, propriedades e materiais**. São Paulo: IBRACON, 2008.

NEVILLE, A.M. **Propriedades do Concreto**. São Paulo: Editora Pini Ltda., 1982.

NUNES, S. C. P.; NUNES, U. R.; FONSECA, P. G.; GRAZ ZIOTTI, P. H.; PEGO, R. G.; MARRA, L. M. Época de colheita e armazenamento na qualidade e fisiológica da semente de sempre-viva ( *Sygonanthus elegans* (Bong) Ruhland- Ericaulaceae). **Revista Brasileira de Sementes**, Brasília, v. 30, n.6, p. 1775-17780, nov./dez. 2008.

NUNES, I.H.S. **Estudo das características físicas e químicas da cinza do bagaço de cana-de-açúcar**. Dissertação de Mestrado. PEU/Universidade Estadual de Maringá, 2009.

PAULA, M.O. **Potencial da cinza do bagaço de cana-de-açúcar como material de substituição parcial de cimento Portland**. Dissertação de mestrado. Universidade Federal de Viçosa (UFV), 2006.

PAYÁ, J.; MONZÓ, J.; BORRACHERO, M.V.; MELLADO, A.; ORDONEZ, L.M. Determination of amorphous silica in rice husk ash by a rapid analytical method. **Cement and Concrete Research**, v. 31, p. 227-231, 2001

PAYÁ, J.; MONZÓ, J.; BORRACHERO, M.V.; VELÁZQUEZ, S.; BONILLA, M. Determination of the pozzolanic activity of fluid catalytic cracking residue. Thermogravimetric analysis studies on FC3R–lime pastes. **Cement and Concrete Research**, v.33, n.7, p.1085-1091, 2003.

PERUZZI, A. P. **Comportamento das fibras de vidro convencionais em matriz de cimento Portland modificada com látex e adição de sílica ativa**. Dissertação (mestrado em

Arquitetura) – Escola de Engenharia de São Carlos – Universidade de São Paulo. São Carlos, 2002.

PONTES, J. M. P. N. **Reatividade de pozolanas para argamassas e concretos**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Faculdade de Ciência e Tecnologia – Universidade Nova de Lisboa. Lisboa, 2011.

RODRIGUES, M. S. **Avaliação de cinzas de palha de cana-de-açúcar e sua utilização como adição mineral em matrizes cimentícias**. Tese (Doutorado) – Universidade Estadual de Campinas – Faculdade de Engenharia Agrícola, Campina, 2012.

ROMERO T., Bagaço na construção civil. Agência de Notícias da Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo. Disponível na internet: <<http://www.agencia.fapesp.br/materia/7211/noticias/bagaco-na-construcaocivil.htm>>. Acesso em junho 2014.

SATA V.; TANGPAGASIT, J.; JATURAPITAKKUL, C.; CHINDAPRASIRT, P. Effect of W/B ratios on pozzolanic reaction of biomass ashes in Portland cement matrix. **Cement e Concrete Composites**, v.34, p. 94-100, 2012.

SOARES, M. M. N. S. S. **Influência das condições de queima nas características físico-químicas das cinzas do bagaço da cana-de-açúcar**. Dissertação (Mestrado em Construção Civil) – Escola de Engenharia - Universidade Federal de Minas Gerais. Belo Horizonte, 2010.

SNIC - Sindicato Nacional da Indústria do Cimento. **Relatório Anual de 2013**. Disponível em: <<http://www.snic.org.br>>. Acesso em dezembro de 2014.

TASHIRO, C., IKEDA, K., INOUE, Y. Evolution of pozzolanic activity by the electric resistance measurement method. **Cement and Concrete Research**, v. 24, p. 1133-1139, 1994.

TAYLOR, H.F.W. **Cement chemistry**, London: Thomas Telford, 2ed, 1997, 459 p.

TEXEIRA, R. S. **Utilização de resíduos sucro-alcooleiros na fabricação de fibrocimentos pelo processo de extrusão**. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Materiais) – Escola de Engenharia de São Carlos - Universidade de São Paulo. São Carlos, 2010.

ÚNICA - União da Agroindústria Canavieira do Estado de São Paulo (2010 - 2015) Disponível na internet:<<http://www.unica.com.br>>. Acesso em novembro 2015.

VASCONCELOS, M.C.A. **Avaliação da atividade pozolânica da cinza do bagaço de cana-de-açúcar utilizando métodos físicos**. Dissertação de mestrado. Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2013.

VILLAR-COCIÑA, E.; VALENCIA-MORALES, E.; GONZÁLEZ-RODRÍGUEZ, R.; HERNÁNDEZ-RUIZ, J. Kinetics of the pozzolanic reaction between lime and sugar cane straw ash by electrical conductivity measurement: A kinetic–diffusive model. **Cement and Concrete Research**, v.33, n.4, p.517-524, 2003.

VILLAR-COCIÑA, E. **Modelos cinéticos para la caracterización de materiales pozolánicos y mezclas de moldeo para fundición de hierro**. 168 p. Tese de Doutorado (Doutorado em Ciências Físicas) – Facultad de Matemática, Física y Computación, Universidad Central “Martha Abreu” de las Villas, Santa Clara, Villa Clara, Cuba, 2005.

VILLAR-COCIÑA, E.; FRÍAS, M. R.; VALENCIA-MORALES, E. Sugar cane as pozzolanic materials: application of a mathematical model. **ACI Mater Journal**, v. 105 (3), p.258-264, 2008.

VILLAR-COCIÑA, E.; MORALES, E. V.; SANTOS, S. F.; SAVASTANO JR., H.; FRÍAS, M. Pozzolanic behavior of bamboo leaf ash: characterization and determination of the kinetic parameters. **Cement and Concrete Composites**, v. 33, p.68-73, 2011.

ZARDO, A. M.; BEZERRA, E.M.; MARTELLO, L.S.; SAVASTANO Jr., H. Utilização da cinza de bagaço cana-de-açúcar como “filler” em compostos de fibrocimento. In: I Conferência Latino-americana de Construção Sustentável/x Encontro Nacional de Tecnologia do Ambiente Construído, 2004, São Paulo. **Anais**. São Paulo: Entac, 2004. CD-ROM.