



Universidade Federal de Pernambuco

Centro Acadêmico do Agreste

Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil e Ambiental

LAWRENCE FRANCISCO COSTA

**ESTUDO DO BAGAÇO DA CANA DE AÇÚCAR COMO MATERIAL PARA
CONSTRUÇÃO CIVIL NO ESTADO DE PERNAMBUCO – SISTEMA TERNÁRIO
COM METACALIM E CAL HIDRATADA.**

Caruaru

2017

LAWRENCE FRANCISCO COSTA

**ESTUDO DO BAGAÇO DA CANA DE AÇÚCAR COMO MATERIAL PARA
CONSTRUÇÃO CIVIL NO ESTADO DE PERNAMBUCO – SISTEMA TERNÁRIO
COM METACAU LIM E CAL HIDRATADA.**

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

Caruaru

2017

Catálogo na fonte:

Bibliotecária – Paula Silva – CRB/4-1223

C837e Costa, Lawrence Francisco.
Estudo do bagaço da cana de açúcar como material para construção civil no estado de Pernambuco: sistema ternário com metacaulim e cal hidratada. / Lawrence Francisco Costa. – 2017.
86f.; il.: 30 cm.

Orientador: Antônio Acácio de Melo Neto.
Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Pernambuco, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil e Ambiental, 2017.
Inclui Referências.

1. Bagaço de cana de açúcar. 2. Termogravimetria (Pernambuco). 3. Resíduos industriais (Pernambuco). 4. Engenharia de materiais (Pernambuco). I. Melo Neto, Antônio Acácio de. (Orientador). II. Título.

620 CDD (23. ed.) UFPE (CAA 2017-246)

LAWRENCE FRANCISCO COSTA

**ESTUDO DO BAGAÇO DA CANA DE AÇÚCAR COMO MATERIAL PARA
CONSTRUÇÃO CIVIL NO ESTADO DE PERNAMBUCO – SISTEMA TERNÁRIO
COM METACAILIM E CAL HIDRATADA**

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.

Aprovado em 04/08/2017

BANCA EXAMINADORA

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

D. Sc. Humberto Correia de Lima Júnior – PPGECAM / UFPE
(examinador interno)

D. Sc. Eliana Cristina Barreto Monteiro – UPE
(examinador externo)

Dedico este trabalho ao meu bom Deus, pelo qual sem ele eu não teria a oportunidade de viver e contribuir com a sociedade. Dedico também aos meus pais, Dorian Francisca e José Orlando, meus maiores incentivadores. A toda minha família, irmãos, sobrinhos e amigos, por acreditarem sempre na minha capacidade.

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus, e a todos os espíritos de luz, que nos acompanham durante a caminhada da vida, os quais acompanham nossos passos desde o nascimento, e protegem nossos caminhos. Não fosse isso, a vida certamente não seria tão fascinante e saborosa de viver.

Minha família, que é o que existe de mais valioso, dos quais nos dão amparo sempre que necessário e contemplam nossas conquistas. A família é a base principal da sociedade, pois através dela são transmitidos valores em que se formam pessoas para o mundo. Sou grato pelos meus pais, irmãos, e todos os outros parentes, pelo incentivo e dedicação que nunca faltaram.

Ao meu orientador, Antônio Acácio de Melo Neto, por todo apoio e atenção, por esclarecer inúmeras dúvidas e se mostrar prestativo sempre que necessário. Sua contribuição foi determinante para que este trabalho pudesse ser feito.

Aos professores do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil e Ambiental da UFPE - CAA os quais contribuíram grandemente na minha formação acadêmica, transmitindo seus conhecimentos sempre com destreza e profissionalismo. Poderia citar todos os nomes, mas me restrinjo a mencionar o nome de um deles, capaz de representar todos os outros, o professor Humberto Correia de Lima Júnior, pela camaradagem e toda atenção sempre que necessário, se fazendo presente para todos aqueles que o procurassem.

Ao apoio dos técnicos do Laboratório de Construção Civil da UFPE – CAA, Everton Rodrigues e Fabíola Franca, foram determinantes para a execução de inúmeras etapas concernentes a este trabalho, onde, sem o apoio deles, com certeza os caminhos seriam mais difíceis.

Agradeço também de forma especial, aos meus amigos e mestres, Emerson José da Silva e Pablo Borba de Barros Góes, pelo apoio desmedido em inúmeras frentes, acerca de diversos ensaios, dúvidas recorrentes, os quais estavam sempre prestativos a toda e qualquer solicitação. Nós formamos um time vencedor, dos quais tive o prazer de partilhar da convivência de pessoas como vocês, dedicados, perseverantes, e atenciosos.

A FACEPE – Fundação de Amparo à Ciência e Tecnologia de Pernambuco, órgão fomentador desta proposta de estudo, dos quais disponibilizou inúmeros recursos para que fosse possível concretizar nosso estudo.

Ao Centro de Tecnologias Estratégicas do Nordeste – CETENE, por toda infraestrutura disponibilizada para esta pesquisa, dos qual contribuiu grandemente para que fosse possível realizar inúmeros ensaios. Além disso, vale destacar toda atenção do corpo técnico, do qual menciono a querida Aldenise, e o simpático Isaac, por todo apoio durante esta jornada.

A todos os amigos, colaboradores, técnicos e demais pessoas que direta ou indiretamente contribuíram para a realização deste trabalho. Ninguém faz nada sozinho, e a você minha eterna gratidão.

“A dúvida é o princípio da sabedoria”.
(Aristóteles, 353 a.C).

RESUMO

A indústria da construção civil é um dos maiores consumidores de materiais naturais do mundo, e deste processamento é gerada uma quantidade de resíduo, os quais são capazes de gerar grandes danos ao meio ambiente. Em virtude deste fato, inúmeras pesquisas estão sendo elaboradas com o intuito de destinar os rejeitos industriais, dentro de uma proposta aceitável aos materiais componentes da atividade construtiva, de forma a mitigar os impactos ambientais causados por esta indústria. Nesse contexto, as cinzas agroindustriais ocupam lugar de destaque dentre os resíduos com possibilidades de aplicação, por apresentarem propriedades importantes, como a pozolânica, a exemplo das cinzas de casca de arroz, capazes de contribuir com a redução do consumo de cimento Portland, o qual é uma fonte de poluentes, a partir da emissão de CO₂. No Estado de Pernambuco, se pode destacar os resíduos gerados pela indústria sucroalcooleira os quais estão presentes em larga escala, por se tratar de uma atividade potencialmente ativa no estado, cuja cultura provém desde o período colonial. O material estudado foi a cinza do bagaço da cana-de-açúcar, aqui chamado de CBCA, onde foi avaliado sua atividade pozolânica através de métodos químicos e físicos. A análise ternária avaliada procurou mensurar o consumo de portlandita a partir da inclusão de cinza no sistema com metacaulim e cal hidratada. A CBCA não teve nenhum tratamento térmico, em decorrência de alguns estudos apontarem sobre a influência da temperatura sobre propriedades do material. Foi avaliado o potencial pozolânico da amostra de CBCA em seu estado natural, aqui denominado CAN, em duas faixas de granulometria, a primeira passante na peneira 400, denominado CANP400 e a segunda moída por 7 horas, denominado CANM7H. Além dos ensaios físicos, as amostras foram submetidas aos ensaios previstos na norma ABNT NBR 5751 : 2015, para determinação da atividade pozolânica com Cal aos sete dias (IAC) e, posteriormente, as amostras tiveram sua atividade pozolânica avaliada através da termogravimetria (TG). A partir dos resultados auferidos neste estudo, pode-se entender que a CANM7H apresentou resultados muito melhores se comparado com os da CANP400, onde, este último, só apresentou características pozolânicas quando da inclusão a partir de 30% de Metacaulim (MTC) em sua matriz. Tão logo, a CBCA em seu estado natural apresentou características para ser tomado como um material pozolânico, principalmente quando finamente moído.

Palavras-chave: Cinza. Cana-de-açúcar. Pozolanicidade. Termogravimetria.

ABSTRACT

The civil construction industry is one of the most consumers of natural material in the world, and from this process is generated a quantity of waste, which are capable of generating serious damages to the environment. Therefore, numerous researches are being elaborated with the aim to allocate the industrial residues, within an acceptable proposal for materials that are components of the constructive activity, in order to mitigate the environmental impacts caused by this industry. In this context, the agroindustrial ashes occupy a relevant place among residues with the possibility of application, for presenting important properties, such as the pozzolanic, having the rice husk ash as an example, capable of contributing, on the productive scale, to the reduction of the consumption of Portland cement, which is a source of pollution, with the emission of CO₂. In the state of Pernambuco, it is possible to highlight the residues generated by the sugar-alcohol industry, which are present on a large scale, as it is a sector with intense active in the state, whose culture exists since the colonial period. The material to be studied is going to be the ash from the sugarcane bagasse, to evaluate, from the regulatory norms, the pozzolanic activity through chemical and physical methods. The parameters obtained related to the ash performance will be compared with a reference pozzolane, which in this study is Metakaolin. The ternary analysis to be evaluated, aims to measure the consumption of portlandite, from the inclusion of ash in the system with metakaolin and hydrated lime. The sugarcane bagasse ash, here called SCBA, will not have any thermal treatment, as a consequence of some studies pointing an influence of the temperature on the properties of the material, as a result, its natural capacity will be evaluated, here denominated CAN, in two bands of granulometry, a first passer in the sieve 400, called CANP400, a second ground for 7 hours, called CANM7H. In addition to the physical tests, as samples were submitted to the tests provided for in norm NBR 5751, to determine the pozzolanic activity with Cal at seven days (IAC) and, moreover, as samples were submitted to thermogravimetric analysis so that their pozzolanic activity was evaluated. From the results obtained in this study, it can be understood that the CANM7H presented much better results when compared to those of the CANP400, where the latter only showed pozzolanic characteristics when included from 30% of MTC in its matrix. As soon as the CBCA in its natural state presented characteristics to be taken as a pozzolanic material, especially when finely ground.

Keywords: Ash. Sugarcane. Pozzolanicity. Thermogravimetry.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Gráfico 1 – Escala produtiva da cana-de-açúcar no Brasil para o período de 10 anos, entre 2005/2006 até 2015/2016	18
Gráfico 2 – Escala produtiva da cana-de-açúcar em Pernambuco para o período de 10 anos, entre 2005/2006 até 2015/2016	19
Figura 1 – Representação esquemático da microestrutura da pasta de cimento hidratada, a esquerda sem adição pozolânica e a direita com adição.....	31
Figura 2 – Esquema gráfico que representa a zona de transição entre agregado graúdo e a pasta hidratada de cimento, a direita com adição pozolânica, a esquerda sem adição.....	32
Fluxograma 1 – Programa experimental	42
Gráfico 3 – Distribuição granulométrica da areia quartzosa	46
Organograma 1 – Peneiramento e moagem das amostras de CBCA	49
Gráfico 4 – Difração de Raios-X da CANP400 + CH-I.....	58
Gráfico 5 – Difração de Raios-X da CANM7H + CH-I	58
Gráfico 6 – Difração de Raios-X da MTC + CH-I.....	58
Gráfico 7 – Difração de Raios-X da CH-I	58
Gráfico 8 – Posição $2\theta = 17^\circ$ a $18,57^\circ$ da CAN, agrupamento dos picos de Portlandita	59
Quadro 1 – Resistência a compressão das amostras de CBCA aos 7 dias	62
Quadro 2 – Índice de atividade pozolânica das amostras de CBCA aos 7 dias	63
Gráfico 9 – TG e DTG da amostra de CH-I, na forma de pó, sem liofilizar.....	65
Gráfico 10 – TG e DTG da pasta de Cal Hidratada liofilizada	66
Gráfico 11 – TG e DTG das pastas de Cal hidratada sem liofilizar e liofilizada sobrepostas ..	67
Gráfico 12 – TG Metacaulim na forma de pó sem liofilizar	68
Gráfico 13 – TG da pasta de Metacaulim + Cal hidratada liofilizada.....	69
Gráfico 14a – Comparativo da pasta de MTC + CH versus TG da pasta de CH liofilizada....	70
Gráfico 14b – Comparativo da pasta de MTC + CH versus TG da pasta de CH liofilizada....	71
Gráfico 15 – Fíler em pó sem liofilizar	71
Gráfico 16 – TG da pasta de Fíler + CH liofilizada	72
Gráfico 17a – DTG comparativo da pasta de Fíler + CH versus Pasta CH liofilizada	73
Gráfico 17b – TG comparativo da pasta de Fíler + CH versus Pasta CH liofilizada	74
Gráfico 18a – Gráfico comparativo TG e DTG das amostras de CANM7H com diferentes percentuais de MTC	75

Gráfico 18b – Gráfico comparativo TG e DTG das amostras de CANM7H com diferentes percentuais de MTC	75
Gráfico 19a – Gráfico comparativo TG e DTG das amostras de CANP400 com diferentes percentuais de MTC	77
Gráfico 19b – Gráfico comparativo TG e DTG das amostras de CANP400 com diferentes percentuais de MTC	77

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Óxidos compostos do clínquer e suas abreviações.....	24
Tabela 2 – Quadro de composição química de materiais pozolânicos	26
Tabela 3 - Quadro de composição química de uma amostra de CBCA % em peso	26
Tabela 4 - Quadro de composição química da cinza da casca de arroz	27
Tabela 5 - Composição química de 4 tipos diferentes de CBCA	38
Tabela 6 - Composição química (% óxidos) e perda ao fogo do metacaulim	44
Tabela 7 - Composição química (% óxidos) e perda ao fogo da CBCA	45
Tabela 8 - Características físicas da areia quartzosa.	45
Tabela 9 - Análise química da cal hidratada CH-I	46
Tabela 10 - Propriedades e Características do Aditivo plastificante quartzolite	47
Tabela 11 – Composição química do fíler calcário	47
Tabela 12 - Relação de bolas de alumina, com diâmetros, massas e volumes utilizados na moagem das amostras de CBCA	49
Tabela 13 - Resumo das amostras de CBCA e suas respectivas denominações	50
Tabela 14 - Resumo das propriedades físicas da CBCA submetida aos tratamentos e dos materiais utilizados na pesquisa.	60
Tabela 15 - Resumo das propriedades da mistura ternária com cal hidratada metacaulim e a cinza do bagaço de cana-de-açúcar. Especificação NBR 5751 (2015).	61

LISTA DE EQUAÇÕES

Equação 1 – Reação química para formação da etringita.....	28
Equação 2 – Reação química para formação de monossulfato	28
Equação 3 - Reação de hidratação da Alita	28
Equação 4 – Reação de hidratação da Belita.....	28
Equação 5 – Reação Pozolânica.	30
Equação 6 – Transformação de Caulim em Metacaulim.....	43
Equação 7 – Lei de Bragg.....	51
Equação 8 – Índice de atividade pozolânica.....	61

LISTA DE ABREVIATURA E SIGLAS

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas
AFm – Monossulfoaluminato de cálcio hidratado
AFt – Sulfoaluminato de cálcio (etringita)
C₂S – Belita - Silicato dicálcico
C₃A – Aluminato - Aluminato tricálcico
C₃S – Alita - Silicato tricálcico
C₄AF – Ferrita - Ferroaluminato tetracálcico
CAH – Aluminato de cálcio hidratado
CAN - Cinza do bagaço da cana-de-açúcar “in natura”
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
CH-I – Cal Hidratada 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
SNIC – Sindicato Nacional da Indústria do Cimento
TG - Termogravimetria
ÚNICA – União da Indústria Canavieira do Estado de São Paulo

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	17
1.1	Objetivo geral	21
1.2	Objetivos específicos	21
1.3	Estruturação do Trabalho	22
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	23
2.1	Cimento Portland	23
2.2	Materiais Pozolânicos	26
2.3	Hidratação do cimento Portland	27
2.3.1	<i>As reações pozolânicas dentro do sistema de hidratação do cimento Portland</i>	30
2.4	Método de avaliação da Atividade pozolânica	33
2.4.1	<i>Termogravimetria (TG)</i>	34
2.5	Efeitos da Calcinação sobre a Pozolanicidade da CBCA	36
2.6	A Cinza do bagaço da cana-de-açúcar como adição pozolânica	37
3	MATERIAIS E MÉTODOS	41
3.1	Descrição da área de estudo / programa experimental	41
3.2	Materiais Utilizados	43
3.2.1	<i>Tipos de pozolana: Pozolana de referência (MTC) e CBCA</i>	43
3.2.1.1	<i>Metacaulim</i>	43
3.2.1.2	<i>Cinza do Bagaço de Cana (CBCA)</i>	44
3.2.2	<i>Areia</i>	45
3.2.3	<i>Cal hidratada</i>	46
3.2.4	<i>Aditivo</i>	47
3.2.5	<i>Fíler</i>	47
3.3	Planejamento Experimental	48
3.3.1	<i>Tipos de tratamento: Peneiramento e Moagem CBCA</i>	48
3.4	Procedimentos de ensaio	51
3.4.1	Caracterização Química	51
3.4.1.1	<i>DRX</i>	51
3.4.2	Caracterização Física	52
3.4.2.1	<i>Blaine</i>	52

3.4.2.2	<i>BET</i>	52
3.4.2.3	<i>Massa específica real</i>	52
3.4.3	<i>Avaliação da atividade pozolânica</i>	53
3.4.3.1	<i>ABNT NBR 5751 – Materiais pozolânicos – Determinação da atividade pozolânica com a Cal aos sete dias</i>	53
3.4.3.2	<i>Análise Termogravimétrica (TG)</i>	56
4	ANÁLISE DOS RESULTADOS	57
4.1	Caracterização química	57
4.1.1	<i>Análise de Difração de Raios-X nas amostras de CBCA (DRX)</i>	57
4.2	Caracterização física	60
4.3	Avaliação da Atividade Pozolânica	60
4.3.1	<i>ABNT NBR 5751 : 2015 – Determinação da atividade pozolânica com Cal aos 7 dias</i>	60
4.3.2	<i>Análise Termogravimétrica dos materiais de estudo</i>	64
5	CONCLUSÕES	79
5.1	Proposta para trabalhos futuros	80
	REFERÊNCIAS	81

1 INTRODUÇÃO

Este trabalho está inserido na linha de pesquisa da Fundação de Amparo a Ciência e Tecnologia do Estado de Pernambuco (FACEPE), junto ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil e Ambiental, campus Agreste. O resíduo estudado se trata da cinza do bagaço de cana de açúcar (CBCA), subproduto da Indústria Sucroalcooleira do mesmo Estado, visando como adição ao cimento Portland. A análise da atividade pozolânica foi mensurada através do método físico previsto pela ABNT NBR 5751 : 2015.

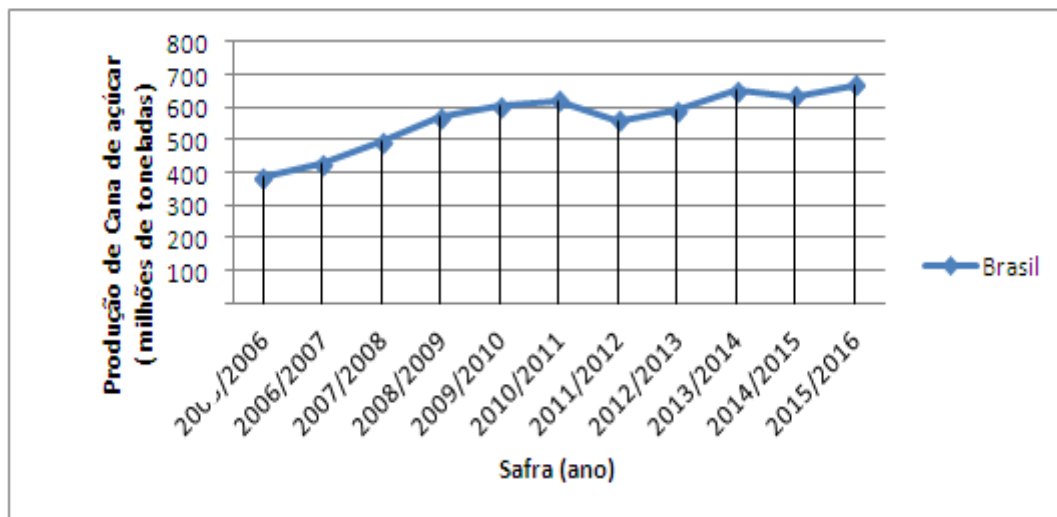
Muitos estudos vêm crescendo nos termos de utilizar resíduos industriais na construção civil, em muitos casos a partir da inclusão na matriz cimentícia, seja pela substituição parcial do cimento Portland, como também servindo de alternativa na condição de agregado miúdo. De modo geral, o emprego destes materiais na matriz cimentícia objetiva um destino adequado a estes materiais tidos como rejeito. Além disso, ainda visa contribuir quanto do desempenho do composto cimentício ao qual o resíduo está sendo incorporado, como também de maneira a minimizar os impactos causados pela emissão de Dióxido de Carbono (CO_2), que é um composto altamente agressivo ao meio ambiente, os quais são gerados na fabricação do cimento. Em decorrência deste, e de outros fatores, existe uma preocupação da indústria cimentícia na busca de tecnologias modernas que venham a minimizar, ou mesmo evitar, parte da ação desses impactos (RODRIGUES, 2012).

Desta forma, objetivamos comprovar através do nosso estudo, que a CBCA apresenta características pozolânicas que a configura como uma opção de matéria prima a ser inserida nos subprodutos cimentícios, sem comprometer o desempenho do componente e, além disso, sendo capaz de mitigar as ações agressivas da produção do cimento sobre o meio ambiente. Se comprovado, além dos objetivos principais já mencionados, outro grande benefício poderá ser auferido em relação ao custo/benefício do material, pois a inclusão da CBCA na matriz cimentícia poderá promover uma redução no consumo de cimento Portland, que consequentemente pode reduzir seus custos de produção.

Nos últimos anos a atividade construtiva no Brasil foi expoente, de modo a aumentar em larga escala o consumo das principais matérias primas necessárias para tamanha demanda. De acordo com o relatório fornecido pelo Sindicato Nacional da Indústria do Cimento (SNIC) no ano de 2013, o consumo aparente *per capita* de Cimento Portland foi de 353 kg/habitante, representando um total de 71 milhões de toneladas.

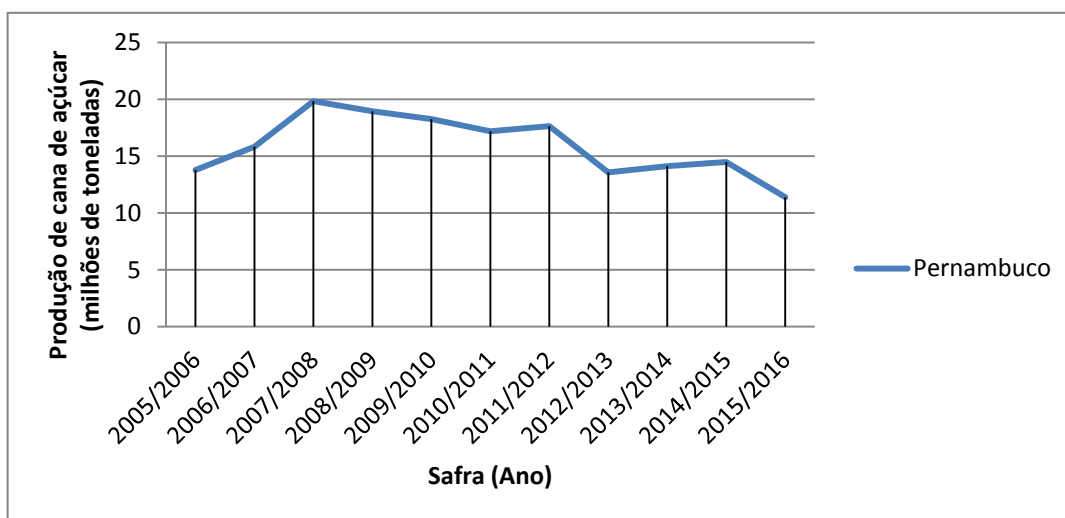
Além da capacidade produtiva de cimento, o Brasil é também o maior produtor mundial de cana-de-açúcar, açúcar e álcool, além de ser o maior exportador mundial de açúcar. Cerca de metade da produção brasileira de açúcar é exportada e, há pelo menos cinco anos, a Rússia figura como o maior comprador do Brasil (FREITAS, 2005). Um dos fatores que mais contribuem para esta capacidade produtiva do país se dá pela crescente demanda de açúcar dos países emergentes, bem como o aumento de carros com a tecnologia flex. No acumulado da safra de 2015/2016, a produção de açúcar no Brasil cresceu 5,19%, totalizando 32,89 milhões de toneladas em relação a safra de 2014/2015. Estes fatos têm impulsionado cada vez mais a produção de cana-de-açúcar no Brasil, cujo plantio se concentra principalmente no Centro-Sul e no Norte-Nordeste, o que permite dois períodos de safra. Atualmente os estados brasileiros com maior produção de cana-de-açúcar, de acordo com a safra 2015/2016 são: Alagoas, Mato Grosso, Mato Grosso do Sul, Minas Gerais, São Paulo, Goiás, Paraná e Pernambuco (ÚNICA, 2017). No Gráfico 1 e 2 apresenta-se a escala produtiva da cana-de-açúcar no Brasil e em Pernambuco, respectivamente, até o ano de 2016.

Gráfico 1– Escala produtiva da cana-de-açúcar no Brasil para o período de 10 anos, entre 2005/2006 até 2015/2016.



Fonte: ÚNICA (2017).

Gráfico 2 – Escala produtiva da cana-de-açúcar em Pernambuco para o período de 10 anos, entre 2005/2006 até 2015/2016.



Fonte: ÚNICA (2017).

A partir da análise do Gráfico 1 e 2 percebe-se que, enquanto no Brasil a escala produtiva da cana-de-açúcar tende a crescer a cada ano, no Estado de Pernambuco apresenta um quadro intermitente e que, em linhas gerais, a produção está diminuindo em relação aos anos anteriores, como verificado na safra 2015/2016 em relação à sua antecessora. Este fato é explicado pelos profissionais do setor sucroalcooleiro em virtude do crítico cenário econômico do país no período, que forçou uma grande quantidade de fazendeiros a diminuir seu plantio, ao passo que inúmeras usinas tiveram que diminuir sua produção, além daquelas que fecharam suas portas.

Nas etapas de produção de açúcar e álcool, o resíduo resultante de maior volume é o bagaço de cana-de-açúcar. Nos últimos anos o bagaço foi bastante valorizado por sua utilização como matriz energética de termoeletricas. De modo geral, o processo de produção energia elétrica utilizando o bagaço é baseado em sua queima nas caldeiras da usina gerando vapor. O vapor gerado é utilizado para movimentar turbinas que por sua vez movimentam os geradores elétricos. (VASCONCELOS, 2013).

Um estudo feito por 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. Dessa cogeração de energia, o resíduo produzido foi a cinza do bagaço de cana. De acordo com Romero (2016), para cada tonelada de cana-de-açúcar moída ocorre a geração em torno de 250 kg de bagaço de cana o qual é queimado nas caldeiras e, por sua vez, produz aproximadamente 6 quilos (2,4 %) de cinza. Com base nesta estimativa, em 2016, o Brasil produziu cerca de 4 milhões de toneladas de cinza do bagaço de

cana. De acordo com os últimos dados da ÚNICA, fornecidos para safra 2015/2016, o estado de Pernambuco apresentou a capacidade de produzir aproximadamente 66 mil toneladas de cinza do bagaço de cana. No entanto, a realidade é que, em grande parte, o resíduo de CBCA é lançado nas lavouras de cana-de-açúcar na condição de fertilizante, mesmo não tendo propriedades que justifiquem esta prática.

A partir dos dados mencionados acerca da produção desta importante matéria prima, tendo em vista seu potencial de utilização no setor construtivo, existem basicamente duas linhas de pesquisa que sugerem a aplicação deste material, seja colocada em argamassas ou no concreto. Uma destas linhas defende a incorporação da cinza ao cimento Portland como adição pozolânica, permitindo assim a redução do consumo de clínquer pela indústria cimentícia e a melhoria da durabilidade dos concretos e argamassas produzidos com esse tipo de adição. Outra proposta se dá pela utilização da CBCA como agregado miúdo, substituindo parcialmente a areia utilizada para a produção da pasta de cimento.

No presente estudo, o enfoque se dará pela utilização do resíduo da cinza do bagaço da cana-de-açúcar (CBCA) como substituição parcial do cimento Portland, onde o resíduo deverá apresentar características que o classifiquem como um material pozolânico a partir da análise Termogravimétrica. A aplicação da TG se justifica por avaliar o consumo de portlandita [$\text{Ca}(\text{OH})_2$], que se trata de uma importante condicionante proposta pela ABNT NBR 12653 : 2012, acerca dos materiais pozolânicos.

Segundo Cordeiro; Toledo e Fairbairn (2009), a existência da pozolanicidade na CBCA ainda não é algo definitivo. Isso porque existem pesquisas que apontam a atividade pozolânica de amostras de cinza do bagaço de cana-de-açúcar, porém, outras pesquisas não denotaram atividade pozolânica satisfatória, a exemplo do estudo proposto por Frías, Villar e Valencia (2007) que avaliou a atividade pozolânica a partir da inclusão de CBCA em diferentes teores na matriz cimentícia, e não obteve resultados satisfatórios para pozolanicidade, e sim como efeito fíler. Ou seja, grande parte dos estudos avaliados apresentam aspectos benéficos do uso da CBCA, quer seja pelo o efeito fíler, quer seja pelo efeito pozolânico. O fato de a cinza apresentar efeito pozolânico significa que o material tem a capacidade de reduzir o calor de hidratação do cimento, de inibir a reação álcali-agregado, elevar a resistência ao ataque por cloretos e sulfatos, ou seja, resumindo, a pozolana é uma adição que eleva a durabilidade do concreto com relação a muitos agentes agressivos. (VASCONCELOS, 2013).

Entendendo sobre a importância do aproveitamento deste resíduo na indústria agrícola, bem como na construção civil, esta pesquisa justifica os seus objetivos, buscando uma utilização eficaz para a CBCA de modo a agregar valor a sociedade tanto nos termos de

sustentabilidade, a partir de um destino louvável para este rejeito industrial, quanto sobre a indústria do cimento, onde, se comprovado a pozolanicidade da cinza, poderá servir de alternativa na substituição parcial do cimento e, tão logo, tender a diminuir a emissão de CO₂ sem comprometer o desempenho mecânico dos subprodutos cimentícios.

1.1 Objetivo geral:

Avaliação do potencial pozolânico da cinza do bagaço de cana-de-açúcar, a partir de uma mistura ternária com Metacaulim e Cal hidratada por meio da utilização do método de Termogravimetria.

1.2 Objetivos específicos:

- Analisar o potencial pozolânico da cinza do bagaço de cana de açúcar em seu estado natural (CAN), o qual é desprovido de tratamento térmico.
- Analisar o potencial pozolânico da CBCA em duas faixas granulométricas, passante na peneira 400 e moído durante 7 horas.
- Avaliar o índice de atividade pozolânica da CBCA a partir do ensaio de resistência mecânica para o sistema ternário de CBCA, Cal Hidratada, e a pozolana de referência (MTC). Com variações no teor de MTC em (0, 10, 20, 30 e 50%).
- Caracterizar as amostras de CBCA por meio de análise química, física, pelo índice de atividade pozolânica regida pela ABNT NBR 5751 : 2015 e pela análise termogravimétrica.

1.3 Estruturação do Trabalho

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

O segundo capítulo trata da revisão bibliográfica acerca dos assuntos abordados neste trabalho, de modo a favorecer o entendimento sobre atividade pozolânica.

No terceiro capítulo descreve-se o programa experimental, todos os materiais utilizados nesta pesquisa quanto da metodologia adotada neste estudo, as caracterizações físicas e químicas, avaliação pozolânica pela análise de termogravimetria, bem como avaliação da atividade com cal pela ABNT NBR 5751 : 2015.

No quarto capítulo, são apresentados os resultados e as discussões, com a análise da influência do grau de finura da CBCA acerca do seu potencial pozolânico, em comparativo com as propriedades da Metacaulim de referência. Além disso, serão também serão discutidos as interações dos materiais na mistura ternária.

No quinto capítulo estão dispostas as conclusões desta dissertação, como também algumas propostas para trabalhos futuros acerca desta temática.

Ao final deste trabalho encontram-se as referências bibliográficas que foram utilizadas ao longo desta pesquisa.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Cimento Portland

O cimento Portland corresponde a principal matéria prima utilizada dentro do setor construtivo, seja pelo seu emprego em argamassas ou no concreto. Trata-se de um material seco e pulverulento que apresenta propriedades aglomerantes, que, quando misturado com água pode se agregar a materiais inertes tais como areia e brita. Após um determinado período de cura, o cimento em contato com a água tende a ganhar resistência mecânica, em decorrência da rigidez gerada pela sua hidratação. Características como trabalhabilidade e moldabilidade, este último quando no estado fresco, somado a sua resistência a intempéries e agentes agressivos a partir do seu estado de rigidez (hidratado), garantem uma grande gama de aplicações.

Basicamente o cimento Portland é composto pelo clínquer, material este formado pela associação de argila, calcário e minério de ferro, onde posteriormente o gesso é incorporado a matriz. O processo de produção consiste em aproximadamente 80% de calcário, e 20% de argila, os quais são moídos, pré-aquecidos, e posteriormente são queimados em forno rotativo a 1450 °C, formando o clínquer, que corresponde a 95% do material cimentício, somado aos 5% de gipsita, onde, após se agregarem, estes dois são moídos, formando o cimento Portland (MELO NETO, 2007). A composição química do clínquer geralmente apresenta 67% de CaO, 22% de SiO₂, 5% de Al₂O₃, 3% de Fe₂O₃ e 3% de outros componentes (TAYLOR, 1997).

Segundo Mehta e Monteiro (2008), 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, conforme pode ser visto na Tabela 1.

Tabela 1 - Óxidos compostos do clínquer e suas abreviações

Óxido	Abreviação	Compostos	Abreviação
CaO	C	3CaO . SiO ₂	C ₃ S
SiO₂	S	2CaO . SiO ₂	C ₂ S
Al₂O₃	A	3CaO . Al ₂ O ₃	C ₃ A
Fe₂O₃	F	4CaO . Al ₂ O ₃ . Fe ₂ O ₃	C ₄ AF
MgO	M	4CaO . 3 Al ₂ O ₃ . SO ₃	C ₄ A ₃ F
SO₃	Ŝ	3CaO . 2 SiO ₂ . 3 H ₂ O	C ₃ S ₂ H ₃
H₂O	H	CaSO ₄ . 2H ₂ O	CSH ₂

Fonte: Mehta e Monteiro (2008).

Como a produção do clínquer envolve alto consumo energético e a emissão de gás carbono na atmosfera, devido à queima da argila e do calcário, ao substituir parte deste, além de vantagens econômicas, se tem uma série de benefícios ambientais. Boa parte das adições utilizadas pela indústria cimentícia provém de resíduos industriais, o que aumenta ainda mais os benefícios ambientais do seu uso, seja através da redução do consumo de energia no processo de fabricação do cimento, ou pela diminuição da emissão de CO₂ na atmosfera. (VASCONCELOS, 2013). De acordo com o Sindicato Nacional da Indústria do Cimento (SNIC), o uso de cimentos com adição iniciou timidamente na década de 50, e ganhou impulso a partir da década de 90, onde atualmente, quase 100% dos cimentos comercializados no país possuem algum teor de adição. No entanto, esta incorporação de adições ao cimento em substituição parcial ao clínquer se deu a partir de diversos estudos sobre o comportamento e demais benefícios que esta prática possa trazer aos concretos e argamassas. Através de inúmeras análises pode-se notar como estas adições interagem com o clínquer e, a partir da obtenção de bons resultados, o passo seguinte foi identificar adições de baixo custo que tivessem comprovada eficácia.

Estas adições normalmente são de origem mineral, onde as principais delas consistem na cinza volante, fíler calcário e escória de alto forno. Historicamente o primeiro material usado como adição foram as cinzas volantes, provenientes da atividade da vulcânica, no entanto, como poucas regiões no mundo dispõem deste material em abundância, a indústria cimentícia buscou outros materiais de propriedades físicas e químicas que fossem suscetíveis a serem utilizados como adições como no caso do fíler e da escória, ambos rejeitos industriais. Nesse contexto, existe um comportamento peculiar para cada adição dentro da matriz cimentícia que as configuram em três categorias básicas: inerte, cimentante e pozolânica (NUNES, 2009).

No primeiro caso, as adições inertes são aquelas que não reagem quimicamente com a pasta de cimento, porém, devido à sua característica física em virtude da sua extrema finura são capazes de provocar o chamado efeito fíler. Este tipo de adição é capaz de melhorar o empacotamento granulométrico o que resulta em argamassas e concreto com melhor trabalhabilidade no estado fresco e menor porosidade no estado endurecido. Alguns tipos a serem utilizados como adições inertes se dão pelo uso do calcário e pó de quartzo, por exemplo. (MELO NETO, 2007).

No caso das adições cimentantes, o comportamento da adição no estado hidratado é similar ao do clínquer, o que resulta numa condição aglomerante, no entanto, normalmente estas adições hidratam e ganham resistência mais lentamente. Estando misturado ao cimento, podem ter seu processo de hidratação acelerado, podendo inclusive, substituir até 70% do clínquer. A escória de alto forno é um exemplo que figuram dentro desta condição. (VASCONCELOS, 2013).

Por último, estão as adições pozolânicas que consistem, segundo a ABNT NBR 12653 : 2012, são materiais silicosos ou silicoaluminosos que por si só, possuem pouca ou nenhuma atividade aglomerante, mas que quando finamente divididos e na presença de água, reagem com o hidróxido de cálcio à temperatura ambiente para formar compostos com atividades aglomerantes. Ainda segundo a norma, são classificados em duas categorias acerca da origem do material, são elas: Naturais e Artificial. As naturais são aquelas que dispensam qualquer tipo de tratamento, seja eles térmico ou de granulometria, a exemplo das cinzas volantes. No caso das pozolanas artificiais, existe a necessidade deste tratamento, para que o material se configure dentro das propriedades físicas e químicas básicas, para ser utilizado como adição, como é o caso da CBCA proposto neste estudo.

Para auxiliar o entendimento sobre as reações pozolânicas e as vantagens de sua incorporação na matriz cimentícia, se faz necessário a compreensão sobre o material pozolânico em si, associado aos processos químicos que levam a formação da pasta de cimento hidratada.

2.2 Materiais Pozolânicos

As pozolanas são materiais constituídos basicamente por sílica (SiO_2) e alumina (Al_2O_3), em estado seco, geralmente não possuem propriedades ligantes, mas em contato com água reage quimicamente com o hidróxido de cálcio $[\text{Ca}(\text{OH})_2]$ ou soluções alcalinas contendo Ca^{2+} e tendem a adquirir características aglomerantes (MELO NETO, 2007).

De acordo com TAYLOR (1997), a composição química principal das pozolanas consiste conforme a Tabela 2.

Tabela 2 – Quadro de composição química de materiais pozolânicos

Óxido de silício, de alumínio, de ferro e de cálcio, e anidrido sulfúrico	$\leq 5\%$
Teor de carbono	$\leq 5\%$
MgO	$< 4\%$
Na_2O	$< 1,5\%$
$[\text{SiO}_2 + \text{Fe}_2\text{O}_3 + \text{Al}_2\text{O}_3]$	$\geq 70\%$
Neste composto a Sílica predomina sobre os demais.	

Fonte: TAYLOR (1997).

Partindo dos parâmetros químicos para caracterização de um material pozolânico e para efeitos de comparação, um estudo feito por Paula (2006) demonstrou a composição química de uma amostra de CBCA, determinada através de espectrometria de fluorescência de raios-x, que pode ser observada na Tabela 3.

Tabela 3 – Quadro de composição química de uma amostra de CBCA % em peso

SiO_2	Fe_2O_3	K_2O	CaO	TiO_2	SO_3	ZrO_2	Cr_2O_3	MnO	Sc_2O_3	ZnO	V_2O_5
83,7	6,5	6,15	1,18	1,16	0,68	0,30	0,094	0,081	0,04	0,037	0,029

Fonte: PAULA (2006).

Nota-se que o teor de Sílica, principal elemento de um material pozolânico, demonstrado na Tabela 3 atende o especificado por Taylor (1997). Além disso, pode haver distinções quanto dos percentuais destes componentes em relação à outra amostra de CBCA, em virtude de alguns fatores a serem discutidos ao longo deste trabalho.

Para efeito comparativo, um estudo feito por Cordeiro (2006) demonstrou a composição química da cinza da casca de arroz, que se trata de uma pozolana conhecida, com a finalidade

de comparar suas propriedades com as da CBCA e, desta forma, sugerir a CBCA como uma opção de material pozolânico, conforme se vê na Tabela 4.

Tabela 4– Quadro de composição química da cinza da casca de arroz

Componentes	Composição (%)
SiO₂	92,15
K₂O	2,41
Al₂O₃	1,55
CaO	0,99
Fe₂O₃	0,06
Impurezas	2,84

Fonte: Cordeiro (2006).

Nestes termos, a cinza do bagaço de cana-de-açúcar gerada pela queima do bagaço na geração de energia dentro do setor sucroalcooleiro, comprovadamente possui característica semelhantes à de outras cinzas vegetais pozolânicas, como a da casca de arroz, exposta na Tabela 4.

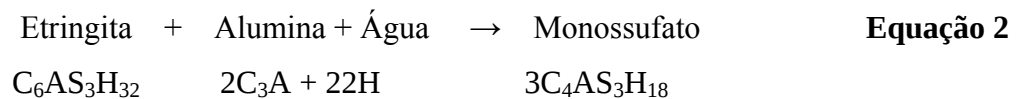
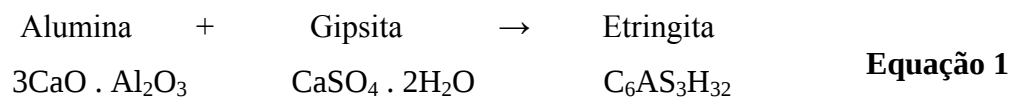
De acordo com Taylor (1997), as principais vantagens ao utilizar a pozolana como adição ou substituição parcial ao cimento pode se dar em decorrência de alguns fatores: 1- elas afetam os produtos de hidratação, tornando mais lenta e, conseqüentemente, diminuindo a liberação de calor, 2 - benefícios ambientais, como a redução de CO₂ e a diminuição da sua deposição em aterros, 3 - a sua resistência a compressão aumenta em longo prazo.

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).

2.3 Hidratação do cimento Portland

O poder 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 (C₃A) e Ferrita (C₄AF) e, conjuntamente, correspondem 10% à 25% do clínquer em volume (TAYLOR, 1997).

Os Aluminatos hidratam muito rapidamente, provocando o enrijecimento da pasta de cimento e, conseqüentemente, sua perda de mobilidade. Para retardar a hidratação dos aluminatos e, assim, 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 ($\text{C}_6\text{AS}_3\text{H}_{32}$), conforme a Equação 2.1. Parte da Etringita é posteriormente convertida em Monossulfatos ($\text{C}_4\text{ASH}_{13}$), estágio final da hidratação dos Aluminatos (Equação 2.2). (VASCONCELOS, 2013).



Já os silicatos têm uma hidratação mais lenta. Eles são subdivididos em duas fases: Alita (C_3S), que corresponde a 50% à 70% do volume do clínquer, e a belita (C_2S), que varia entre 15% e 30%. Por estarem em maior quantidade, os Silicatos são os compostos mais importantes do clínquer e responsáveis pela alta resistência mecânica da pasta de cimento endurecida. (MELO NETO, 2007). A partir da hidratação dos silicatos C_2S e C_3S no cimento Portland, é formado 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). (TAYLOR, 1997)

Ainda segundo Taylor, a Alita (C_3S) é responsável pela resistência mecânica inicial na pasta em estado endurecido, enquanto que a Belita (C_2S) é responsável pelo aumento da resistência em idades avançadas. Estudos de DRX, feitos pelo autor comprovaram que apenas 30% da Belita reage com 28 dias e 90% reage após um ano. As reações de hidratação da alita e belita são descritas por meio das Equações 2.3 e 2.4, respectivamente.



O C-S-H é um gel amorfo de silicato de cálcio hidratado, tem uma estrutura em camadas com uma elevada área superficial. É o composto mais abundante na pasta de cimento compondo de 50 à 60% de seu volume. Os cristais de C-S-H tem a tendência de se aglomerarem e são eles 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. (TAYLOR, 1997).

No caso dos hidróxidos de cálcio, também chamados de portlandita, existem 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. (MELO NETO, 2007).

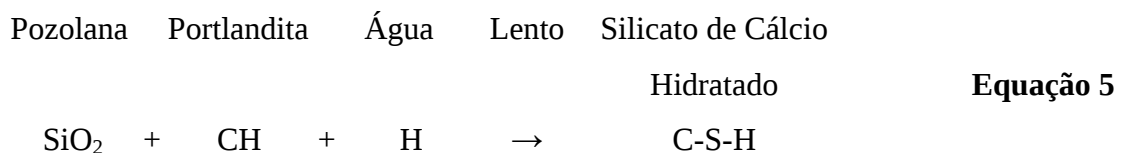
Segundo Taylor (1997) pode-se observar que a hidratação da Alita dá a pasta de cimento resistência mecânica nas suas primeiras idades e a hidratação da Belita interfere mais diretamente na resistência mecânica em idades avançada. Outro ponto a ser observado é que a hidratação da Alita (C_3S) produz 61% de C-S-H e 39% de CH, enquanto a hidratação da Belita (C_2S) gera 82% de C-S-H e 18% de CH.

A partir destas informações, é possível afirmar que 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. (MEHTA e MONTEIRO, 2008).

Contudo, o uso de cimento com elevados teores de Belita não é a única forma de se obter uma pasta de cimento com grandes quantidades de C-S-H. As adições pozolânicas são capazes de converter a portlandita em compostos de C-S-H, melhorando assim, a resistência mecânica da pasta de cimento em idades avançadas. Essa reação química é o principal diferencial entre as pozolânicas e as demais adições minerais e também contribui para o refinamento dos poros e dos grãos. As partículas de C-S-H são menores se comparados com a CH, sendo capazes de ocupar vazios capilares, também possuem maior área específica, proporcionando a pasta de cimento resistência mecânica. (VASCONCELOS, 2013).

2.3.1 As reações pozolânicas dentro do sistema de hidratação do cimento Portland

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). Nesse contexto o gel C-S-H é o principal produto de hidratação do cimento Portland, conforme pode ser visto na Equação 2.5 que ilustra esta reação pozolânica.



É possível observar, a partir da Equação 2.5, que a pozolana consumiu a portlandita (CH) existente na pasta de cimento hidratada e se transformou no gel C-S-H. De acordo com Vasconcelos (2013), 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 avançadas.

A ABNT NBR 12653 : 2012 estabelece que, para um material ser considerado pozolânico, a soma de seu óxidos de SiO_2 , Al_2O_3 e Fe_2O_3 deve totalizar no mínimo 50% de sua massa, sendo justamente estes óxidos responsáveis pela transformação da portlandita em C-S-H. Além disso, a mesma norma divide os materiais pozolânicos em 3 classes: classe N para as pozolanas naturais e artificiais, contemplando as argilas calcinadas em que inclui o metacaulim; classe C para a cinza volante e materiais resultantes da combustão do carvão mineral e classe E para aquelas que não se enquadram na classe N ou C. Ela não prevê o uso de pozolanas originadas de cinzas vegetais.

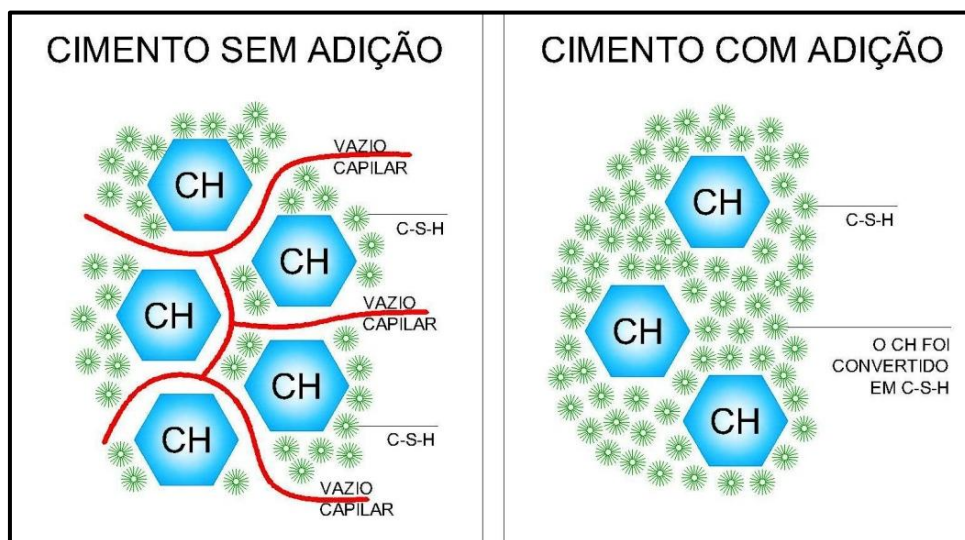
A adição pozolânica pode ocasionar os seguintes fenômenos na pasta de cimento: efeito microfíller, refinamento da estrutura dos poros e do tamanho dos grãos dos produtos hidratados do cimento e alteração da microestrutura e da zona de transição em concretos.

Todos estes efeitos são extremamente benéficos, pois, em longo prazo, tendem a melhorar a durabilidade e a resistência mecânica de argamassas e concretos com este tipo de adição (ISAIA, 2011).

O efeito microfíller 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. Devido ao efeito fíler se obtém argamassas e concretos com melhor trabalhabilidade no estado fresco e menor porosidade no estado endurecido. (VASCONCELOS, 2013).

Ainda segundo Isaia (2011), o refinamento da estrutura dos poros e do tamanho dos grãos ocorre quando as partículas pozolânicas agem como pontos de nucleação. Desta forma, a produção de produtos hidratados não ocorre apenas na superfície dos grãos de cimento, mas também nos poros ocupados pelas partículas de pozolana e água. Com a redução dos vazios entre os grãos de cimento, há uma restrição de espaço para o crescimento de seus produtos hidratados gerando, assim, vários cristais de reduzida dimensão (CSH) ao invés de poucos cristais de grande tamanho (CH), conforme pode ser visto na Figura 1.

Figura 1 – Representação esquemático da microestrutura de uma pasta de cimento hidratada, a esquerda sem adição pozolânica e a direita com adição

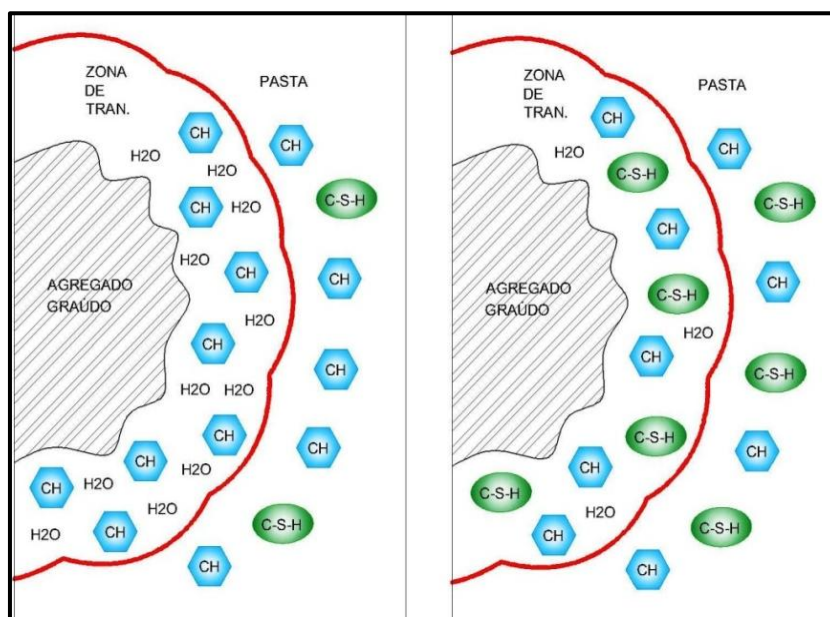


Fonte: VASCONCELOS (2013).

Segundo Vasconcelos (2013), outro efeito químico provocado pela reação pozolânica é a alteração de microestrutura da zona de transição, cujos benefícios são extremamente vantajosos para estruturas de concreto. Normalmente, há um acúmulo de água livre, a qual não está quimicamente combinada e fica rente aos agregados graúdos do concreto. Essa água

enfraquece a zona de transição entre a pasta e o agregado, sendo normalmente a região onde ocorre a fratura do concreto. A adição pozolânica reduz o acúmulo de água livre e transforma o CH, que está em excesso na zona de transição, em gel de C-S-H, aumentando assim a resistência mecânica do concreto, conforme pode ser visto na Figura 2.

Figura 2 – Esquema gráfico que representa a zona de transição entre agregado graúdo e a pasta hidratada de cimento, a direita com adição pozolânica, a esquerda sem adição



Fonte: VASCONCELOS (2013).

Apenas o cimento Portland comum não é capaz de conferir aos concretos especiais elevada resistência mecânica e durabilidade combinadas com adequada trabalhabilidade. A adição pozolânica, combinada com aditivos redutores de água é fundamental para a produção de concretos de alto desempenho, bem como os de alta resistência (MEHTA, 2008).

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 ocorridos nas misturas e dependem do tamanho das partículas da pozolana (SATA et al, 2012).

Uma das principais vantagens da utilização de adição pozolânica em concretos é o aumento de sua durabilidade, visto que a reduzida porosidade da pasta de cimento com adição dificulta a entrada de agentes agressivos ao concreto e na 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. Esta reação gera um gel expansivo no interior do concreto que leva à fissuração do mesmo. Como a pozolana consome as moléculas de CH, a reação álcali-agregado fica impedida de ocorrer por não haver álcalis livres no sistema (VASCONCELOS, 2013).

2.4 Método de avaliação da Atividade pozolânica

Dentro do escopo de se utilizar a CBCA em substituição parcial ao cimento Portland, algumas metodologias podem ser empregadas na verificação de atividade pozolânica dentro da matriz cimentícia, eles costumam ser divididas em dois grupos: os métodos físicos, aqueles que medem a resistência mecânica e os métodos químicos que são os que analisam as reações químicas.

Para o primeiro, os métodos físicos, algumas normatizações podem ser aplicadas para sua verificação, são elas a ABNT NBR 12653 : 2012 sobre Materiais Pozolânicos e a ABNT NBR 5751 : 2015 que determina o índice de atividade pozolânica com a Cal hidratada aos 7 dias. No caso dos métodos químicos, os mais tradicionais prescritos pela norma brasileira são o método de Chapelle modificado (ABNT NBR 15895 : 2010) e o método de Fratini (NBR 5753 : 2016). Estes dois métodos têm como principal característica a obtenção de resultados rápidos, quando comparados aos ensaios de resistência mecânica, mas, estes também sofrem críticas, em decorrência de não acompanharem a evolução da reação pozolânica, em virtude do seu processo acelerado (VASCONCELOS, 2013). Mesmo assim se trata de métodos bastante úteis, pois são capazes de fornecer parâmetros confiáveis sobre o potencial pozolânico do material estudado, sem que sejam necessários longos períodos.

Apesar disso, Taylor (1997) afirma que os métodos químicos não substituem a observação das propriedades com aplicação do material com potencial pozolânico em argamassas e, preferencialmente, em concretos. O autor afirma que os métodos químicos são limitados em virtude de sua pouca representatividade na resistência mecânica aos 28 dias, a qual depende mais da relação água/aglomerante do que propriamente da atividade pozolânica.

Diversas pesquisas acerca da avaliação pozolânica dos materiais concordam que os métodos químicos e físicos, apesar de coerentes quanto da tentativa de comprovar a admissibilidade dos parâmetros, divergem entre si quanto do seu processo de obtenção de resultados. Ou seja, normalmente são métodos utilizados de modo a convergir no seu propósito, mas que podem conflitar no seu resultado, visto que pode acontecer para um mesmo material, a caracterização

como material pozolânico por parte de um método e não ser admissível pelo outro (GAVA, 1999).

Em decorrência disto, para que se tenham resultados mais confiáveis, se faz necessário uma avaliação mais rigorosa, através de métodos específicos que possam comprovar a pozolanicidade de determinado material, como na análise termogravimétrica, objeto de estudo deste trabalho.

2.4.1 Termogravimetria (TG)

O método da termogravimetria se utiliza de uma técnica que avalia a variação de massa, seja de ganho ou perda, de um determinado material em função de uma variação de temperatura controlada (CORDEIRO, 2006).

Enquanto a substância é submetida a faixas de temperaturas controladas pelo equipamento, os diferentes compostos químicos que compõem o material analisado tendem a se transformar, principalmente em virtude das reações ocorridas nas diferentes temperaturas de controle. Com base nesse princípio e conhecendo a composição química do material, é possível quantificar a presença de uma fase pela perda de massa a uma dada temperatura (MELO NETO, 2007).

Sabendo-se que pela utilização da análise termogravimétrica é possível identificar o consumo de portlandita, fato este que caracteriza uma reação pozolânica, um estudo feito por Cordeiro; Filho e Fairbairn (2009), buscou analisar as amostras de CBCA com base em inúmeros experimentos, dentre eles o uso a TG. A curva da análise térmica diferencial verificada pelos autores revelou um pico exotérmico com valor máximo na temperatura de 228 °C, o que indica eliminação de substâncias voláteis e combustão de carbonos remanescentes da queima do bagaço em forno mufla. Ainda neste estudo, a perda de massa total até 950 °C, obtida pela curva termogravimétrica foi igual a 6,23%, visto que o ideal regido pela ABNT NBR 12653 : 2012 está compreendido em até 6%.

Já o estudo feito por Tashima e outros (2012), se utilizou do método da TG para avaliar a reatividade da cinza da casca de arroz, o qual é um material já utilizado como adição pozolânica no setor construtivo, analisando a sua atividade pozolânica. O método consistiu em analisar a variação de massa do material a partir da imposição de uma temperatura controlada na amostra, quantificando, por exemplo, a perda de massa do material em função da desidratação dos silicatos, aluminatos, silicoaluminatos e hidróxido de cálcio gerados na hidratação do cimento Portland. Neste estudo, os autores se utilizaram da CCA em

substituição parcial da massa do cimento na ordem de 5, 10 e 15%, com relação água/aglomerante de 0,5. Na avaliação da curva da análise termogravimétrica destes materiais, pode-se observar um pico no intervalo de 120-150 °C, que indica perda de massa devido a desidratação dos produtos formados durante a hidratação do cimento Portland (C-S-H, C-A-H, C-A-S-H). Outro pico a ser observado ocorreu na temperatura de 550 °C, indicando a perda de massa devido a desidroxilação do hidróxido de cálcio (portlandita) o que caracteriza reação pozolânica, onde a partir de outras análises, propuseram de forma conclusiva que a CCA serve como uma alternativa de adição a ser utilizada na matriz cimentícia.

Além destes, outros estudos se utilizaram do método da TG de maneira a quantificar o consumo de portlandita de modo que, somado a análises químicas e físicas, pudesse caracterizar o material como alternativa para adições pozolânicas. Ciente de que a temperatura e a moagem sejam fatores determinantes capazes de influenciar a pozolanicidade de um dado material, visto que diversos estudos constataram uma temperatura tida como ideal na ordem de 600 °C, este trabalho busca analisar a amostra de CBCA sem que haja a imposição de temperatura sobre a amostra, de modo a verificar seu potencial pozolânico a partir de uma condição natural.

2.5 Efeitos da Calcinação sobre a Pozolanicidade da CBCA

Um estudo feito por Goés (2016) e Silva (2016), analisaram a pozolanicidade da CBCA a partir de sua calcinação em diferentes faixas de temperatura, assim como no estado natural (CAN). O intuito dos autores era o de avaliar qual seria a melhor condição para obter a cinza mais reativa. As temperaturas de queima estudadas por eles foram de 300 °C, 400 °C, 500 °C e 600 °C e o resfriamento da mufla ocorreram da forma natural denominado resfriamento lento. Tão logo, a denominação das amostras foi em função da temperatura máxima de queima a qual a foram submetidas, tão logo, receberam 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).

Silva (2016) constatou em seu trabalho, que existe uma tendência da redução do índice de atividade pozolânica das amostras de CBCA à medida que aumentou sua faixa de temperatura de calcinação, onde a temperatura de 600°C apresentou os piores resultados. Este fato corrobora com outros estudos, o que evidencia ser resultado da formação de sílica cristalina diante de altas temperaturas, reduzindo assim a reatividade da cinza. Tal comportamento não foi observado quando comparado a CB500 com a CB400.

Vasconcelos (2013) analisou as amostras de CBCA a partir das seguintes temperaturas: 600 °C, 700 °C e 800°C, com taxa de aquecimento de 10 °C/min. A partir da obtenção dos resultados, Vasconcelos obteve os melhores desempenhos numa faixa de temperatura próxima dos 600 °C, o que propõe novamente que a partir de certa faixa de temperatura a amostra de CBCA tende a ficar mais cristalina, tão logo, com menor potencial pozolânico.

Em função destes resultados, se torna necessário uma análise a partir de temperaturas inferiores as já estudadas, de modo a verificar a pozolanicidade da CBCA a partir de temperaturas inferiores. Com este intuito, as análises a serem descritas se utilizaram das amostras de CBCA teoricamente menos pozolânicas se comparadas àquelas submetidas a faixas de temperatura controladas. Ou seja, será avaliado o potencial pozolânico daquelas em seu estado natural, aqui denominada CAN.

Em se tratando de uma mistura ternária, constituído das amostras de cinza, cal hidratada, e material pozolânico de referência, o metacaulim exercerá um papel determinante nestas análises. Não apenas por ser o material pozolânico a ser utilizado, mas por estar presente em diferentes taxas percentuais, de modo a influenciar na pozolanicidade do sistema, e que seja possível mensurar tal influência na matriz ternária.

2.6 A Cinza do bagaço da cana-de-açúcar como adição pozolânica

Um tema bastante relevante dentro da linha de pesquisa de materiais e componentes de construção civil é a avaliação das características do potencial pozolânico de novos materiais. Dentre muitos, destaca-se o estudo do potencial da CBCA como material pozolânico em argamassas de cimento Portland, tanto em função de sua composição química, na qual se destaca pelo elevado teor de dióxido de silício, como também por se tratar de um resíduo importante da região nordeste, especificamente no Estado de Pernambuco (CORDEIRO; TOLEDO E FAIRBAIRN 2009).

Atualmente, o Brasil é o maior produtor de derivados de cana-de-açúcar no mundo e a produção tende a crescer continuamente devido a Política Nacional de Biocombustíveis (ÚNICA, 2016). Este fato pode acarretar problemas ambientais em decorrência da geração de resíduos provenientes da CBCA, no entanto pode ser contornada por meio de soluções tecnológicas. A indústria da Construção apresenta um grande potencial para a diminuição de problemas dessa natureza, principalmente em função da viabilidade que apresenta por meio da incorporação de resíduos industriais em alguns materiais componentes. Uma vez que a construção civil consome grandes quantidades de recursos naturais, vários estudos estão sendo realizados nesse setor, objetivando a substituição (total ou parcial) de algumas de suas matérias-primas por resíduos industriais comprovadamente admissíveis para uso. (LIMA, 2012).

Um dos subprodutos da produção da cana-de-açúcar é o seu bagaço, assim 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, ocorre a venda do excedente energético para distribuidoras (NUNES, 2009). A queima do bagaço da cana é a principal forma de geração de energia dentro de uma usina de cana-de-açúcar. Tal prática produz uma grande quantidade de cinza pesada que ficam no fundo das caldeiras, a qual é composta basicamente de materiais inorgânicos com aspecto grosseiro, compostos por sílica (FREITAS, 2005).

É prática recorrente pelas usinas depositar a CBCA como adubo, visto que se trata de uma atividade inadequada, pois este resíduo apresenta poucos nutrientes minerais, o que o torna um material de difícil degradação.

Um estudo feito por Lima (2012) analisou diferentes amostras de CBCA com intuito de verificar a composição química de cada uma delas, conforme ilustrada na Tabela 5.

Tabela 5 – Composição química de 4 tipos diferentes de CBCA

	CBCA-1 (%)	CBCA-2 (%)	CBCA-3 (%)	CBCA-4 (%)
SiO₂	88,2	96,2	62,7	93,5
Fe₂O₃	5,1	1,7	8,8	2,6
Al₂O₃	2,3	0,2	4,5	1,2
K₂O	1,3	0,3	1,8	0,8
Na₂O	0,1	-	0,1	<0,1
TiO₂	1,0	0,2	3,1	0,5
CaO	0,6	0,1	0,9	0,4
P₂O₅	0,4	0,1	0,7	0,2
MgO	0,4	<0,1	0,6	0,3
SO₃	<0,1	0,1	0,2	<0,1
LOI	0,35	1,04	16,28	0,34

Fonte: LIMA (2012).

Avaliando os parâmetros propostos, nota-se que os teores de Sílica, principal componente dos materiais pozolânicos, estão dentro do parâmetro admissível, com exceção da amostra CBCA-3, que apresentou discrepância na sua composição. Segundo Cordeiro, Toledo e Fairbairn (2009), a amostra CBCA-3 diferiu dos demais em termos de teor de sílica e perda ao fogo. Esta característica pode ser devido ao sistema de recolha de cinzas, que mistura as cinzas residuais das caldeiras com as cinzas volantes das chaminés, alterando suas propriedades. Ademais, as outras amostras de CBCA avaliadas, de acordo com os parâmetros químicos propostos por Taylor (1997), estão dentro da margem exigida para ser considerado um material pozolânico.

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 (H₄SiO₄) 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). Segundo Vasconcelos (2013) trata-se de 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 uma usina para outra 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.

Temperaturas de queima mais baixas produzem CBCA com maior concentração de carbono e tonalidade próxima ao preto e temperaturas mais elevadas produzem CBCA com reduzida concentração de carbono e com tonalidade clara. Além da temperatura de queima ainda há outros fatores que influenciam as características físicas e químicas da CBCA: espécie botânica da cana utilizada, tipo do solo em que foi plantada, condições climáticas, processo de colheita e moagem, safra e região do país em que foi produzida. Contudo, toda CBCA, independente do seu processo de produção, apresenta elevada porosidade e é composta por uma grande quantidade de SiO_2 , que pode chegar a 98% da massa da CBCA e pequenas proporções de FeO_3 , AlO_3 e outros óxidos. (CASTRO, 2012).

De acordo com Paula (2006), há estudos sobre a CBCA em vários lugares do mundo, no entanto, há diferenças bastante discrepantes entre as amostras, uma vez que suas características são influenciadas pelas condições de queima e até mesmo pela moagem. As principais diferenças entre as cinzas ocorrem nas características mineralógicas, ou seja, na forma com que a sílica se encontra que pode ser cristalina ou amorfa. Em condições não controladas é gerado cinza que pode conter altos teores de carbono e matéria orgânica. De maneira complementar, Cordeiro (2006) afirma que outra possível fonte de sílica para a cinza seja a areia (quartzo) oriunda da lavoura. Nestas situações a areia pode não ter sido retirada completamente da cana após seu processo de lavagem que antecede a moagem. Esta água que é utilizada no processo de lavagem é reaproveitada para limpar a caldeira, fazendo com que a areia se misture a CBCA produzida.

Com o objetivo de estudar a resistência à compressão, permeabilidade à água, e a evolução de calor do concreto contendo CBCA, os autores Chusilp, Jaturapitakkul e Kiattikomol (2009) afirmam que em geral, a cinza do bagaço é descartado em aterros sanitários e, agora, está se tornando um fardo ambiental, devido a grande quantidade, uma vez que favorece o uso desse resíduo. Em estudos que utilizaram diferentes cinzas de resíduos da indústria do açúcar como materiais pozolânicos em ligantes cal – pozolana, os autores constataram que a CBCA poderia ser classificado como um material pozolânico, uma vez que as propriedades físicas e mecânicas do concreto endurecido foram melhoradas.

Já os estudos de Paula (2006), analisou amostras de CBCA produzidas em laboratório com duas queimas: a primeira por 6h a 600°C e a segunda por 3h a 700°C, ambas em mufla. Posteriormente, a cinza passou 11h de moagem para homogeneizar sua granulometria e aumentar sua superfície específica e reatividade. Os resultados obtidos pela autora para os índices de atividade pozolânica comprovaram a pozolanicidade da CBCA, visto que os índices de atividade pozolânica obtidos em seu estudo foram maiores que o estabelecido pela

regente destes termos a ABNT NBR 5752 : 2014 que trata dos materiais pozolânicos acerca do índice de desempenho do cimento Portland aos 28 dias.

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 (CORDEIRO, 2006).

Segundo Vasconcelos (2013), 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 na forma de gás. De forma complementar, o tratamento físico de moagem também pode ser determinante, uma vez que, quanto mais fina for a CBCA, mais reativa ele tende a ser, pois haverá maior área de contato da cinza com a pasta de cimento, gerando grande número de pontos de nucleação para a reação pozolânica.

Ainda em relação a moagem, se trata de uma iniciativa que pode beneficiar grandemente o material nos termos de pozolanicidade, tendo em vista que o tratamento térmico consome energia e que este consumo pode se dar de tal forma que seja capaz de inviabilizar a inclusão da CBCA na matriz cimentícia em virtude de um custo-benefício pouco atrativo. Não apenas pelo objetivo sustentável, mas visando diminuir o consumo energético da indústria cimentícia, se busca avaliar a CBCA com a menor manipulação possível, como forma de baratear os processos através do uso de um resíduo com alto potencial de utilização. Desta forma, a CBCA deste estudo não será submetida a nenhum tipo de tratamento térmico, buscando apenas caracterizá-lo a partir de uma faixa granulométrica originada de uma moagem capaz de torná-la pozolânica e, posteriormente, corroborada pela análise termogravimétrica.

Na avaliação da CBCA como alternativa para adição a matriz cimentícia, este estudo é complementar ao dos autores Goés e Silva (2016), onde as amostras avaliadas pelos autores são as mesmas aqui utilizadas. As distinções entre os pesquisadores se deram principalmente através das formas de avaliação da atividade pozolânica, onde, nestas análises ocorreram através da TG.

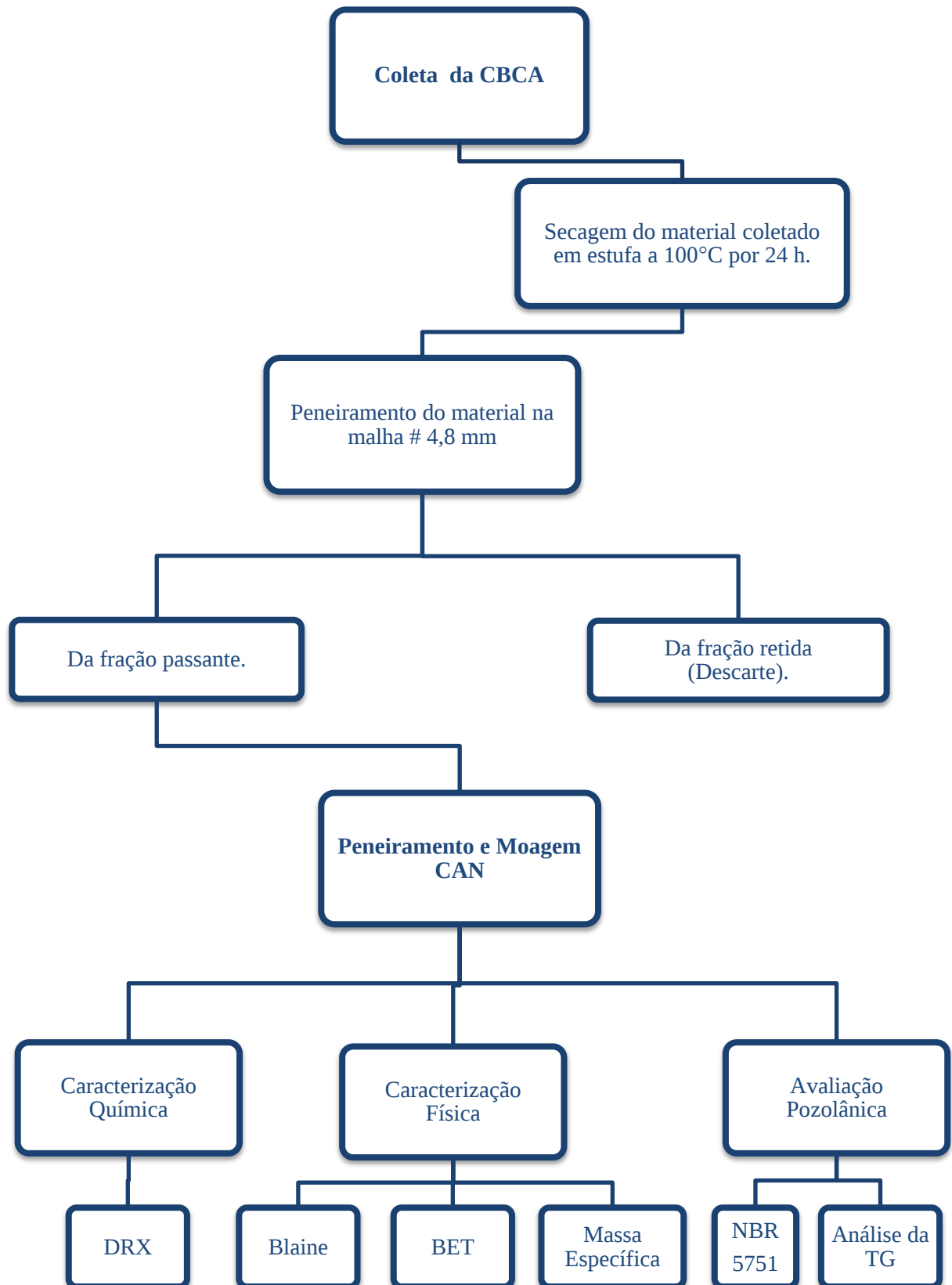
3 MATERIAIS E MÉTODOS

3.1 Descrição da área de estudo / programa experimental

Este trabalho foi baseado em um programa experimental com o objetivo de avaliar a atividade pozolânica de amostras de CBCA a partir análise termogravimétrica, a qual foi escolhida porque os resultados obtidos por ela permitem avaliar o consumo de portlandita, que compreende uma das diretrizes comprobatórias de atividade pozolânica. Além desta técnica aplica-se também a Norma Brasileira para determinação da atividade pozolânica conforme especificado pela ABNT NBR 5751 : 2015 (Materiais Pozolânicos – Determinação de atividade pozolânica).

Esta pesquisa é fomentada pela Fundação de Amparo a Ciência e Tecnologia do Estado de Pernambuco (FACEPE) e coordenada pelo professor Antônio Acácio de Melo Neto da Universidade Federal de Pernambuco (UFPE), pertencente ao Núcleo de Tecnologia do Centro Acadêmico do Agreste (CAA) localizado no município de Caruaru-PE.

As cinzas foram avaliadas quanto a sua reatividade, por meio de caracterizações físicas, químicas e avaliação da sua pozolanicidade, e as etapas desenvolvidas no processo estão demonstradas no Fluxograma 1.

Fluxograma 1 - Programa Experimental.

Fonte: Autor (2017).

3.2 Materiais Utilizados

3.2.1 Tipos de pozolana: Pozolana de referência (MTC) e CBCA

Neste projeto serão utilizados dois tipos de pozolanas: a cinza do bagaço da cana-de-açúcar e um material pozolânico de referência, neste último caso a Metacaulim, a qual é um material comercializado no Estado de Pernambuco.

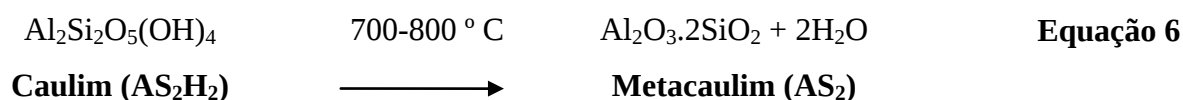
A CBCA utilizada é oriunda do processo de produção álcool e açúcar, fornecida pela usina JB, localizada no município de Vitória de Santo Antão, Engenho Cachoeirinha s/n, Estado de Pernambuco. A cinza foi retirada diretamente da caldeira na qual o bagaço de cana-de-açúcar foi queimado.

Nesse contexto, como citado nos objetivos específicos, o sistema ternário consistido de CBCA, Cal hidratada e MTC, terão teores distintos da parcela de MTC no sistema, que irão variar 0, 10, 20, 30 e 50%.

3.2.1.1 Metacaulim

O metacaulim é o material pozolânico amorfo de estrutura cristalina desordenada, obtido por processo industrial de ativação térmica entre 600°C e 850°C e moagem de argilas cauliníticas e caulins. Essas matérias-primas são compostas predominantemente por silicato de alumínio hidratado $[\text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_5(\text{OH})_4]$, que perdem os íons hidroxila de sua estrutura cristalina com a calcinação, transformando-se em metacaulinita ($\text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_7$), composto constituído essencialmente por partículas lamelares com estrutura predominantemente não cristalina e com elevada finura (CUNHA, FORTI E SILVA, 2010).

O processo de transformação do Caulim em Metacaulim a partir da ativação térmica pode ser percebido na Equação 3.1



O metacaulim utilizado, produzida pela empresa Caulim do Nordeste S.A. possui cor alaranjada e uma granulometria fina. Na Tabela 6 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 6 - Composição química (% óxidos) e perda ao fogo do metacaulim.

Óxidos:	Resultado (%)	Óxidos:	Resultado (%)
CaO	1,0	SiO₂	49,3
Al₂O₃	32,9	Fe₂O₃	10,3
SO₃	0,1	MgO	0,3
TiO₂	1,7	Na₂O	0,1
P₂O₅	0,2	K₂O	1,7
MnO	0,1	ZrO₂	0,1
SrO; CuO; V₂O₅	-	Perda ao Fogo	1,7
TOTAL		99,5 %	

Fonte: Autor (2017)

3.2.1.2 Cinza do Bagaço de Cana (CBCA)

A amostra de CBCA extraída no Estado de Pernambuco teve seu processo de produção consistido nas seguintes etapas: 1) queima do bagaço de cana em caldeira, para geração da cinza; 2) retirada da cinza da caldeira com água que foi utilizada para lavagem da cana-de-açúcar, e por último 3) a mistura de água e cinza é depositada em tanque para decantação.

A queima do bagaço da cana foi realizada em caldeira a uma temperatura de aproximadamente 300°C, para geração da cinza. A amostra coletada apresentou cor escura e granulometria grosseira, indicando uma cinza com elevado teor de carbono.

Para fins de 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, onde o material retido foi posteriormente descartado.

Na Tabela 7 são demonstrados os principais componentes da CBCA deste estudo a partir da análise química por fluorescência de raios - X do material passante na peneira malha 4,8 mm (*in natura*).

Tabela 7 - Composição química (% óxidos) e perda ao fogo da CBCA.

Óxidos:	Resultado (%)	Óxidos:	Resultado (%)
CaO	0,7	SiO₂	89,2
Al₂O₃	2,2	Fe₂O₃	1,7
SO₃	0,3	MgO	0,3
TiO₂	0,3	K₂O	2,3
P₂O₅	0,7	Cr₂O₃	-
NiO; MnO	-	Perda ao Fogo	2,14
TOTAL		99,84 %	

Fonte: Autor (2017)

Percebe-se através de uma análise preliminar, que os componentes atendem a condição para materiais pozolânicos, principalmente se considerado o teor de Sílica $\geq 70\%$, que neste caso correspondeu a 89%.

3.2.2 Areia

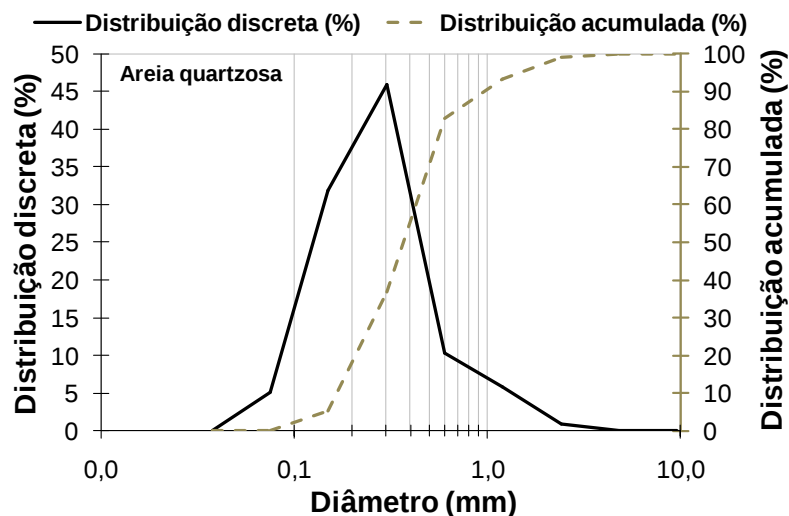
No preparo dos corpos de prova de argamassa foi utilizada a areia quartzosa, lavada, passada na peneira de abertura de 4,8 mm. A secagem da fração passante ocorreu em estufa a 105°C por 24 horas, após esse procedimento o material foi armazenado em baldes para a espera da sua utilização. Na Tabela 8 são apresentadas as características físicas do material e no Gráfico 3 sua distribuição granulométrica.

Tabela 8 - Características físicas da areia quartzosa.

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

Fonte: Autor (2017)

Gráfico 3 – Distribuição granulométrica da areia quartzosa.



Fonte: Autor (2017)

3.2.3 Cal Hidratada

Para a moldagem dos corpos de prova pelo método prescrito pela norma ABNT NBR 5751 : 2015, 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. Na Tabela 9 estão apresentados os componentes químicos fornecidos pelo seu fabricante.

Tabela 9 - Análise química da cal hidratada CH-I.

Caracterização	Resultado (%)
Química:	
CaO	71,70
MgO	0,75
Resíduo Insolúvel	1,13
Umidade	0,62
Perda ao Fogo	25,50
CO₂	1,59
SO₃	0,25
Fe₂O₃ + Al₂O₃	0,74

Fonte: Autor (2017)

3.2.4 Aditivo

A partir da aplicação da ABNT NBR 5751 : 2015 que verifica o índice de atividade pozolânica com cal, neste trabalho se utilizou 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 10.

Tabela 10 - Propriedades e Características do Aditivo plastificante quartzolite.

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

Fonte : Weber – Saint Gobain (2017).

3.2.5 Filer

O fíler utilizado neste estudo foi doado pela fabricante dos cimentos Nassau. A utilização deste material visa dissociá-lo em relação a Metacaulim, sendo que ambos os materiais servem como adições, mas de comportamentos distintos, conforme será visto nos resultados. A composição química deste material, conforme fornecido pelo fabricante está ilustrado na Tabela 11.

Tabela 11 – Composição química do Fíler Calcário.

Calcário AA	
CO₃T	89,11%
MgCO₃	2,32%
CaCO₃	86,36%

Fonte: Cimentos Nassau (2017).

3.3 Planejamento Experimental

Tendo em vista que a pozolanicidade de um material possa ser afetado por fatores determinantes como Moagem e Calcinação, as amostras de CBCA a serem avaliadas neste trabalho não sofrerão tratamentos térmicos, buscando, desta forma, avaliar a pozolanicidade do material na sua forma mais básica, ou seja, em seu estado natural, nomeado CAN. Em relação a granulometria do material, serão utilizados as frações passantes na peneira nº 400, sem moer, denominada CANP400, e moída por 7 horas no moinho de bolas, denominada CANM7H.

Vale salientar que o material pozolânico de referência, neste caso a Metacaulim, não sofrerá qualquer tipo de tratamento, pois se trata de um material adquirido no mercado e, portanto, pronto para utilização.

3.3.1 *Tipos de tratamento: Peneiramento e Moagem CBCA*

No tratamento consistido em peneirar e moer as amostras de CBCA foi traçado o objetivo de se auferir quatro patamares de finura em relação ao material de estudo. Então, com o objetivo de realizar o trabalho de peneiramento, foi utilizado um conjunto adaptado de peneiras granulométricas quadradas com dimensões 50 x 50 x 10 cm, da marca Pavitest, a qual permite a troca de tela.

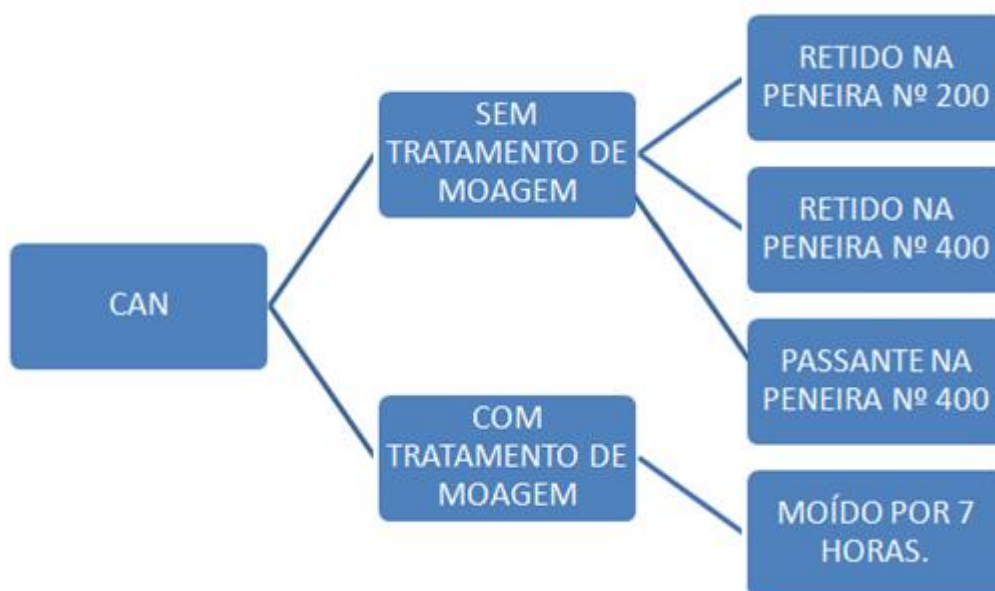
Conforme ilustrado no Fluxograma 1, o processo de peneiramento ocorreu da forma que segue:

- a Inicialmente foram pesados 2,0 kg de cinza a serem colocados na peneira #200 (0,075mm), onde o material passante foi, posteriormente, submetido à peneira malha #400 (0,038mm).
- b Para cada peneiramento foi realizado seis (6) ciclos de peneiramento mecânico de 15 minutos, com intervalos de 5 minutos, tendo um total de 2 horas de peneiramento. Este intervalo de tempo foi dado em função do equipamento não suportar trabalhar por 1 hora e 30 minutos sem intervalos.
- c No fim do peneiramento obtiveram-se as seguintes amostras: as cinzas retidas na peneira de malha 200 (#200), passante na malha (P200) e retida na malha 400 (#400) e passante na malha 400 (P400), amostras foram recolhidas e guardadas em potes com as devidas identificações.

Já nos termos de moagem das cinzas, foram realizadas em um moinho rotativo de bolas da marca Tecnal, onde 71 bolas foram utilizadas, as quais correspondem a uma massa de 3000 g, como apresentado na Tabela 12. A velocidade de rotação foi de 200 RPM e o período de moagem foi de 7 horas. Em cada moagem foram utilizados 1300 g de cada uma das amostras de cinza (CAN).

Vale salientar que o grau de moagem estabelecido para 7 horas com uso do moinho de bolas, parte do estudo feito por Vasconcelos (2013), onde a autora verificou que períodos inferiores a 7 horas são pouco eficazes na atribuição da CBCA como material pozolânico, e é a partir deste intervalo que o material apresenta os melhores resultados, beneficiado pela sua maior finura. O organograma 1 ilustra este tratamento das cinzas para execução do ensaio.

Organograma 1 – Peneiramento e moagem das amostras de CBCA.



Fonte: Autor (2017)

Tabela 12 - Relação de bolas de alumina, com diâmetros, massas e volumes utilizados na moagem das amostras de CBCA.

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

Fonte: Autor (2017).

Do procedimento de peneiramento/moagem descritos até aqui, foram obtidos como resultados três variações sem moagem, sendo elas: 1- retido na peneira de Nº 200; 2- retido na de Nº 400, 3- passante na peneira de Nº 400 e, por último, a partir das cinzas passantes da malha 400 moídas por 7 horas, consistindo 4 tipos básicos de CBCA a partir de sua granulometria. No entanto só foram utilizados neste estudo os dois últimos.

A partir da realização dos tratamentos descritos para as amostras de CBCA, na Tabela 13 apresenta-se um resumo dos materiais pozolânicos a serem avaliados, bem como sobre a MTC a ser utilizada como referência.

Tabela 13 - Resumo das amostras de CBCA e suas respectivas denominações

AMOSTRAS	DESCRIÇÃO
MTC	Metacaulim - material pozolânico de referência, adquirido no mercado.
CANP400	CBCA “in natura”, sem moer e passante na peneira Nº 400 (0,038 mm).
CANM7H	CBCA “in natura”, moída por 7 horas no moinho de bolas.

Fonte: Autor (2017)

Além da influência da temperatura sobre o potencial pozolânico de uma amostra, as faixas granulométricas dos materiais a partir do seu peneiramento, também podem ser determinantes. Dado a avaliação feita por Silva (2016) e Vasconcelos (2013), os autores obtiveram melhores resultados nas avaliações da atividade pozolânica a partir de uma escala crescente no grau de finura das amostras de CBCA.

Então, a partir desta última informação, além deste trabalho focar nas cinzas em seu estado natural (CAN), a faixa granulométrica a ser utilizada também foi definida para duas situações, a CANP400 e CANM7H, as quais, baseado nos conceitos propostos na literatura, a partir da sua faixa granulométrica, devem apresentar um potencial pozolânico superior a cinza retida na peneira 200 e 400, em virtude de serem mais reativos em função de sua finura.

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 Universidade Federal Rural de Pernambuco. Na Figura 3.1 foi apresentado o fluxograma de atividades do programa experimental, partindo da proposta de ensaios para as amostras de CAN.

3.4.1 Caracterização Química

3.4.1.1 DRX

Esse processo se utiliza do fenômeno de espalhamento da radiação eletromagnética, provocada pela interação entre o feixe de raio-x incidente e os elétrons dos átomos componentes de um material.

Esse princípio se utiliza da lei de Bragg (1913), conforme ilustrado na Equação 3.2.

$$n\lambda = 2d \sin(\theta) \text{ onde:}$$

Equação 7

λ – comprimento de onda da radiação,

d – distância entre os planos atômicos

θ – orientação desses planos em relação ao feixe, ângulo de Bragg

n – ordem de difração

Nessa técnica, a radiação incide em uma amostra onde são medidos os fótons que são difratados, o equipamento utilizado é o difratômetro que mostra o resultado em forma de um registro gráfico dos sinais que as reflexões originam em detectores eletrônicos de radiação.

3.4.2 Caracterização Física

3.4.2.1 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 Ø9cm, óleo colorido, vazador e pipetador de borracha de 3 vias, acondicionado em estojo de madeira, no Laboratório de Construção Civil da UFPE – CAA.

3.4.2.2 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°C e pressão de 100 μ mHG por 24 horas, no Laboratório de Nanotecnologia do Centro de Tecnologia Estratégicas do Nordeste (CETENE) em Recife-PE.

3.4.2.3 Massa específica real

A determinação da massa específica real da cinza foi realizada por meio do multipicnômetro 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.

3.4.3 Avaliação da Atividade Pozolânica

O ensaio de pozolanicidade consiste em avaliar o índice de atividade pozolânica de uma adição dentro da matriz cimentícia. Como já mencionado, este trabalho avaliará o índice de atividade pozolânica para a CAN, que se trata das amostras em seu estado natural, ou seja, desprovidas de qualquer tipo de tratamento térmico. Em virtude de outras pesquisas terem demonstrado que amostras de CBCA submetidas a calcinação e/ou finamente moídas apresentarem potencial pozolânico, o objetivo desta pesquisa é avaliar a capacidade da CBCA com este potencial teoricamente inferior as demais e, a partir da obtenção dos resultados, compreender se ainda assim elas possam ser aceitas como um material pozolânico.

Esta avaliação se dará a partir da aplicação da ABNT NBR 5751 : 2015 que determina o índice de atividade pozolânica com a Cal aos 7 dias (IAC). Além deste último, e de forma complementar, será avaliado o consumo de portlandita $[\text{Ca}(\text{OH})_2]$ a partir da análise termogravimétrica, que consiste em outra forma de caracterização da pozolanicidade de um determinado material.

3.4.3.1 ABNT NBR 5751 – Materiais pozolânicos – Determinação da atividade pozolânica com a Cal aos sete dias.

A determinação do índice de atividade pozolânica em materiais pozolânicos através do índice de atividade com cal (IAC) é realizada pela ABNT NBR 5751 : 2015, 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 : 2012, deve-se apresentar resistência média maior ou igual a 6 MPa. A principal crítica deste método no Brasil está na utilização da cal hidratada, em virtude da baixa qualidade das cales no mercado, tornando-se difícil encontrar uma cal que atenda as exigências estabelecidas pela norma.

A ABNT NBR 5751 : 2015 estabelece uma série de procedimentos em relação ao preparo das argamassas e dos corpos-de-prova para a determinação do IAC, na seguinte ordem:

- i) 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;

- ii) A quantidade de água para a mistura deve corresponder a um índice de consistência de (225 ± 5) mm obtido no ensaio de abatimento, conforme prescreve a ABNT NBR 7215 : 1997.
- iii) 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 ± 2) °C durante (24 ± 2) horas e, em seguida, acondicionados em uma temperatura de (55 ± 2) °C, durante (144 ± 2) horas.

O Procedimento de Moldagem para dos corpos-de-prova para análise de atividade pozzolânica ocorreu da seguinte maneira.

- I. A cinza e a cal hidratada foram misturadas e bem homogeneizadas em recipiente fechado.
- II. A água de amassamento foi colocada na mistura.
- III. Os corpos-de-prova foram moldados em sacos plásticos e vedados com filme plástico.
- IV. Os corpos-de-prova foram armazenados por 24 horas em uma temperatura de (23 ± 2) °C.
- V. Após as 24 horas iniciais, posteriormente os corpos-de-prova foram colocados na estufa e mantidos durante as (144 ± 2) h posteriores a uma temperatura de (55 ± 2) °C até $(4 \pm 0,5)$ h antes que fossem submetidos ao freezer e então congelados.

Este procedimento se fez necessário para que as amostras pudessem ser submetidas a avaliação Termogravimétrica. Já em relação ao preparo das argamassas a serem avaliadas pela sua consistência e dos corpos-de-prova a partir da sua resistência a compressão, o processo ocorreu da seguinte forma:

- 1) Preparação das fôrmas dos corpos-de-prova com óleo, para que após o período de estufa não fique aderidas as paredes internas;
- 2) Pesagem de todo o material, deixando apenas a água e a cal hidratada para pesadas no momento da moldagem. Trata-se de uma recomendação da mesma norma.
- 3) A cinza e a cal hidratada devem ser misturadas e homogeneizadas em recipiente fechado, durante 2 minutos.
- 4) Colocar toda a água de amassamento na cuba da argamassadeira.

- 5) Após a colocação da água, a mistura que corresponde a cinza mais a cal hidratada devem ser colocadas na cuba. Em seguida os materiais são misturados com o misturador na velocidade baixa, durante 30 s.
- 6) 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.
- 7) Em seguida, após o tempo previsto para mistura com areia, desligar o misturador durante 1 min e 30 s.
- 8) Nos primeiros 15 s, retirar, com auxílio de uma espátula, a argamassa que ficou aderida às paredes da cuba e à pá do misturador, as quais não foram suficientemente misturadas, colocando-as, em seguida, no interior da cuba.
- 9) Durante o tempo restante (1 min e 15 s), a argamassa deve ficar em repouso na cuba, coberta com pano limpo e úmido.
- 10) Imediatamente após este intervalo, ligar o misturador na velocidade alta, por mais 1 min.
- 11) Para o ensaio de consistência: lubrificar ligeiramente a bandeja do aparelho de consistência com óleo mineral; colocar a argamassa no molde troncônico no centro da bandeja e moldar em 3 camadas (15, 10 e 5 golpes); após a moldagem executar 30 golpes em 30 segundos para que, em seguida, seja medido o espalhamento do material com o auxílio do paquímetro. O resultado deve ser compreendido entre 225 ± 5 mm.
- 12) Findado a etapa de análise de consistência, a argamassa proveniente da mistura é colocada na mesa de vibração por 1 minuto. Para que seja possível adensar o material que terá sua resistência a compressão avaliada.
- 13) Após o período de vibração, o material é lacrado e tampado no corpo-de-prova, devidamente identificado. Tão logo serão acomodados por 24 horas em recipiente retangular que esteja aberto, posicionados em local com temperatura de $(23 \pm 2) ^\circ\text{C}$.
- 14) Imediatamente após as 24 horas, os corpos-de-prova são submetidos durante (144 ± 2) h posteriores, a uma temperatura de $(55 \pm 2) ^\circ\text{C}$ até $(4 \pm 0,5)$ h antes do ensaio de ruptura à compressão, quando os corpos de prova devem estar a uma temperatura de $(23 \pm 2) ^\circ\text{C}$.

A ABNT NBR 5751 : 2015 estabelece que para a determinação do IAC devam ser confeccionados 3 corpos-de-prova para cada amostra de material pozolânico a ser avaliado.

3.4.3.2 *Análise Termogravimétrica (TG):*

Trata-se de uma análise térmica, da que avalia a mudança de massa de uma substância, seja de ganho ou perda, a partir de uma programação de faixas temperatura controladas a qual o material analisado foi submetido. (MELO NETO, 2007).

Dentre inúmeras aplicações pode-se destacar desde taxas de evaporação e sublimação até a corrosão de materiais em várias atmosferas. O equipamento para estas análises é constituído basicamente de uma microbalança, forno, termopares, e um sistema de fluxo de gás. A variação de massa, proposta na leitura do gráfico gerado pelo equipamento, fornece o resultado requerido para uma avaliação de um material. Neste estudo será avaliado se houve consumido de Portlandita [Ca(OH)_2] para que seja confirmado a ocorrência de reação pozolânica, que consiste em uma das caracterizações da CBCA como material pozolânico.

Os ensaios foram realizados em equipamento da marca NETSZCH modelo STA 449. A termogravimetria foi realizada com o aquecimento (taxa de $10^\circ\text{C}/\text{min.}$) de uma amostra em pó, da pasta, com cerca de 40 mg estocada em temperatura ambiente (26°C). Foi aplicado fluxo de gás nitrogênio de 60 ml/min para manutenção de atmosfera inerte e o ensaio realizado até 1000°C .

A quantificação de hidróxido de cálcio [Ca(OH)_2] consumida foi realizada pela análise do pico característico da desidroxilação que ocorre na faixa de 400 a 600°C , sendo a quantificação obtida diretamente na análise da curva de perda de massa da TG.

4 ANÁLISE DOS RESULTADOS

4.1 Caracterização química

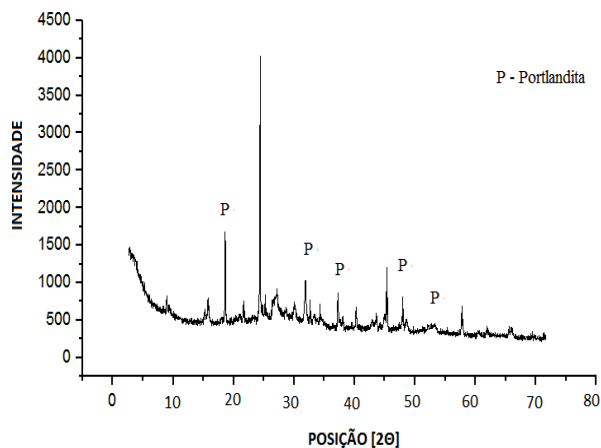
4.1.1 *Análise de Difração de Raios-X nas amostras de CBCA (DRX)*

Os ensaios foram realizados em amostras na forma de pó, em equipamento Difratorômetro 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° a 75° (2θ), varredura com passo angular de $0,02^\circ$ (2θ) com tempo de coleta de 1 segundo por passo, velocidade (SCAN-SPEED) de $20^\circ/\text{min}$.

O resultado obtido pela DRX para as amostras de CANP400 e CANM7H, bem como a pozolana de referência MTC e a cal utilizada CH-I, estão expostos nos Gráficos 4, 5, 6 e 7, respectivamente. As amostras foram moldadas conforme recomenda a ABNT NBR 5751 : 2015, onde a pozolana MTC e o material avaliado CBCA, foram misturados a Cal hidratada para análise dos picos de portlandita da matriz correspondente.

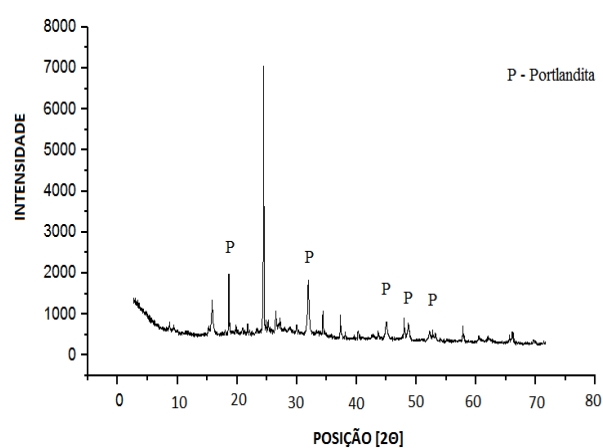
Para este ensaio foram utilizados corpos-de-prova moldados conforme descrito no item 3.4.3.1. Vale ressaltar que as amostras foram mantidas por 24 horas a uma temperatura de 23°C e depois durante 144 horas foram colocados na estufa a 55°C para depois serem congelados. Os corpos-de-prova foram congelados por 8 dias, depois disso eles passaram pelo processo de liofilização para retirar a água que fora capaz de parar a hidratação do composto. Afim de evitar a carbonatação eles foram colocados em um dissecador com sílica gel e hidróxido de bário até a data da realização da DRX.

Gráfico 4 - Difração de raios X da CANP400 + CH-I.



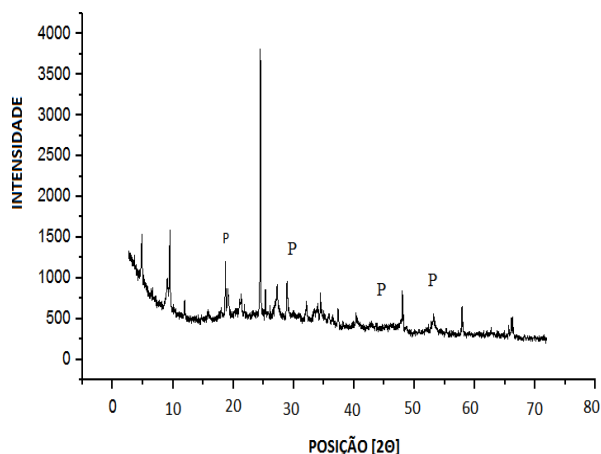
Fonte: Autor (2017)

Gráfico 5 - Difração de raios X da CANM7H + CH-I.



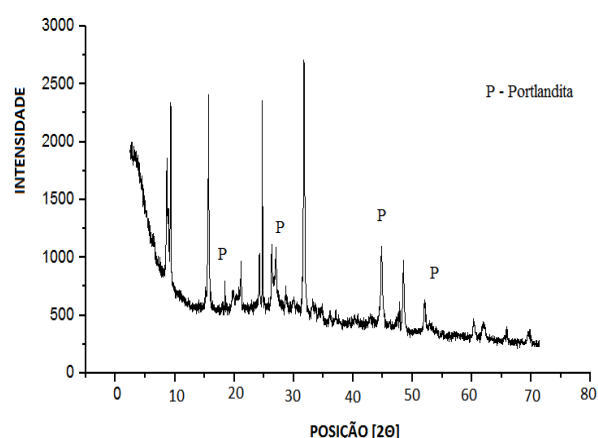
Fonte: Autor (2017)

Gráfico 6 - Difração de raios X da MTC + CH-I.



Fonte: Autor (2017)

Gráfico 7 - Difração de raios X da CH-I.



Fonte: Autor (2017)

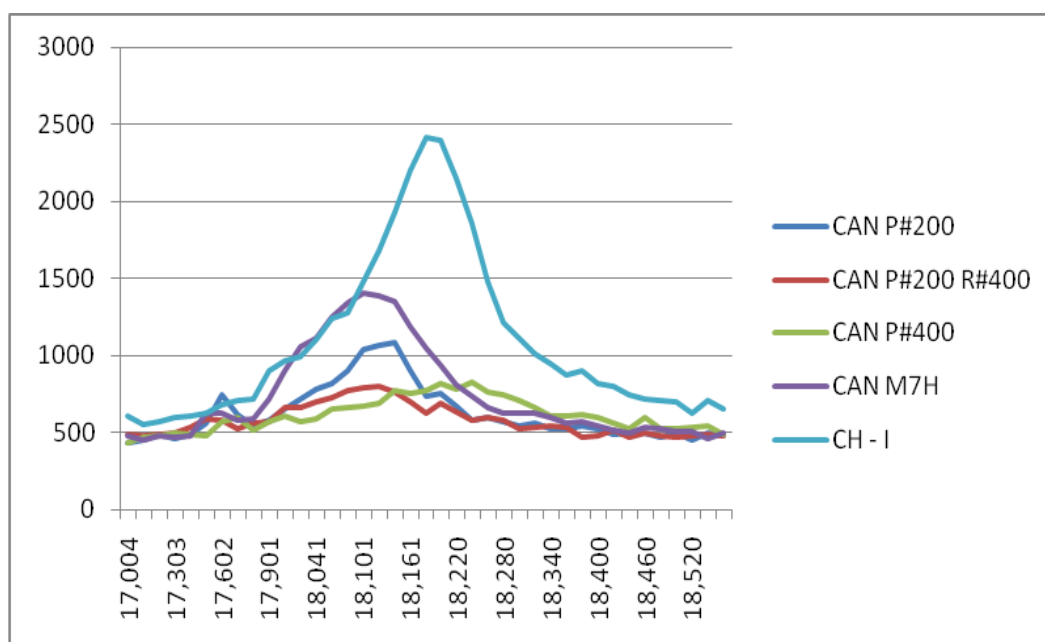
Comparando a intensidade dos picos de portlandita da CANP400 e a CANM7H se percebe que a intensidade da CANM7H em seu maior pico é superior em relação a CANP400. Já no comparativo entre Cal hidratada CH-I cujo valor corresponde a 2400, com a do material pozolânico de referência (MTC) que apresentou um pico de 600, se observou uma acentuada diferença na configuração do gráfico, em função do teor de portlandita nestes materiais. Ou seja, a MTC mitigou o pico de portlandita, o que constitui uma característica de reação pozolânica.

Um estudo feito por Goés (2016) para as mesmas amostras de CBCA avaliou que nos picos de 18° na posição $[2\Theta]$ é possível observar consumo de portlandita na reação, de forma geral a presença dessa fase na formação do cimento está associada a um alto valor de pH, desta forma a presença de materiais de natureza pozolânica costuma amenizar a intensidade desses picos.

Vasconcelos (2013), afirma que a moagem pode intensificar os picos, uma vez que tal comportamento é associado ao aumento do estado de aglomeração das partículas. Além disso, a autora observa também que o aumento da temperatura de calcinação pode provocar o aumento da cristalinidade das amostras de CBCA. Neste caso não houve influencia da temperatura sobre as amostras, visto que ela está sendo utilizada em seu estado natural.

Para as amostras de CAN, avaliadas por Goés (2016), as quais são idênticas a deste trabalho, o autor agrupou o pico das amostras na posição 2Θ , a partir do intervalo $(17 - 18,5^\circ)$ onde há o pico de portlandita a ser considerado. No Gráfico 8 está disposto este agrupamento como forma de ilustrar as diferenças deste material se comparado com a amostra de referência CH-I.

Gráfico 8 - Posição $2\Theta = 17^\circ$ a $18,54^\circ$ da CAN, agrupamento dos picos de portlandita.



Fonte: Goés (2016).

Nas análises dos gráficos de DRX é possível verificar o consumo de portlandita a partir das reações pozolânicas para as amostras de CAN, bem como nas de MTC. Ainda no Gráfico 8 é possível verificar, pelo agrupamento de picos na posição 18° , que o teor de portlandita da CH-I se sobressai veementemente em relação as demais amostras avaliadas. Estas informações servem como base para caracterizar o material como pozolânico ou não, a qual, de acordo

com a ABNT NBR 5751 : 2015, se faz necessário uma avaliação física dos materiais para que se possa validar os parâmetros químicos obtidos.

4.2 Caracterização física

Nesta etapa serão abordados os efeitos dos tratamentos físicos realizados nas amostras de CBCA. Esta avaliação pode ser determinante para caracterização do material como sendo pozolânico ou não. São eles Finura Blaine, análise BET e área específica.

Na Tabela 14, é apresentado o quadro resumo das principais propriedades físicas avaliadas neste trabalho.

Tabela 14 - Resumo das propriedades físicas da CBCA submetida aos tratamentos e dos materiais utilizados na pesquisa.

Amostras	Finura Blaine (m ² /kg)	Área Superficial (BET) (m ² /g)	Massa específica (g/cm ³)
CANP400	1331,54	84,62	2,27
CANM7H	1838,44	143,97	2,35
MTC	2245,49	-	2,60
CAL – CH-I	982,37	-	2,33
FILLER	-	-	2,80

Fonte: Autor (2017)

4.3 Avaliação da Atividade Pozolânica

4.3.1 ABNT NBR 5751 : 2015 – Determinação da atividade pozolânica com Cal aos 7 dias

Na Tabela 15, são apresentados os parâmetros dos quantitativos a serem utilizados na mistura ternária de acordo com a norma ABNT NBR 5751 : 2015 para as amostras de cinza sem tratamento térmico 1) Passante na peneira 400 (CANP400) e 2) moídas por 7 horas (CANM7H). Ambas com diferentes proporções de MTC.

Tabela 15 - Resumo das propriedades da mistura ternária com cal hidratada metacaulim e a cinza do bagaço de cana-de-açúcar. Especificação NBR 5751 (2015).

Mistura	Ca(OH) ₂ (g)	CBCA (g)	MTC (g)	Areia (g)	Água (g)	a/agl	Adit. (%)	Consist. Média (mm)
MTC	104,00	-	232,45	936,00	302,80	0,9	0,8	150,57
CANP400-0%	104,00	202,08	0,00	936,00	275,48	0,9	0,4	141,96
CANP400-10%	104,00	181,88	23,24	936,00	278,21	0,9	0,4	162,07
CANP400-20%	104,00	161,67	46,49	936,00	280,94	0,9	0,4	192,07
CANP400-30%	104,00	141,46	69,73	936,00	283,67	0,9	0,4	177,16
CANP400-50%	104,00	101,04	116,22	936,00	289,14	0,9	0,4	170,96
CANM7H-0%	104,00	209,45	0,00	936,00	282,10	0,9	0,4	251,61
CANM7H-10%	104,00	188,50	23,24	936,00	284,17	0,9	0,4	239,17
CANM7H-20%	104,00	167,56	46,49	936,00	286,24	0,9	0,4	236,10
CANM7H-30%	104,00	146,61	69,73	936,00	288,31	0,9	0,4	224,58
CANM7H-50%	104,00	104,72	116,22	936,00	292,45	0,9	0,4	196,02
FILER								
FÍLER	104,00	-	249,75	936,00	318,38	0,9	0,8	320,88

Fonte: Autor (2017)

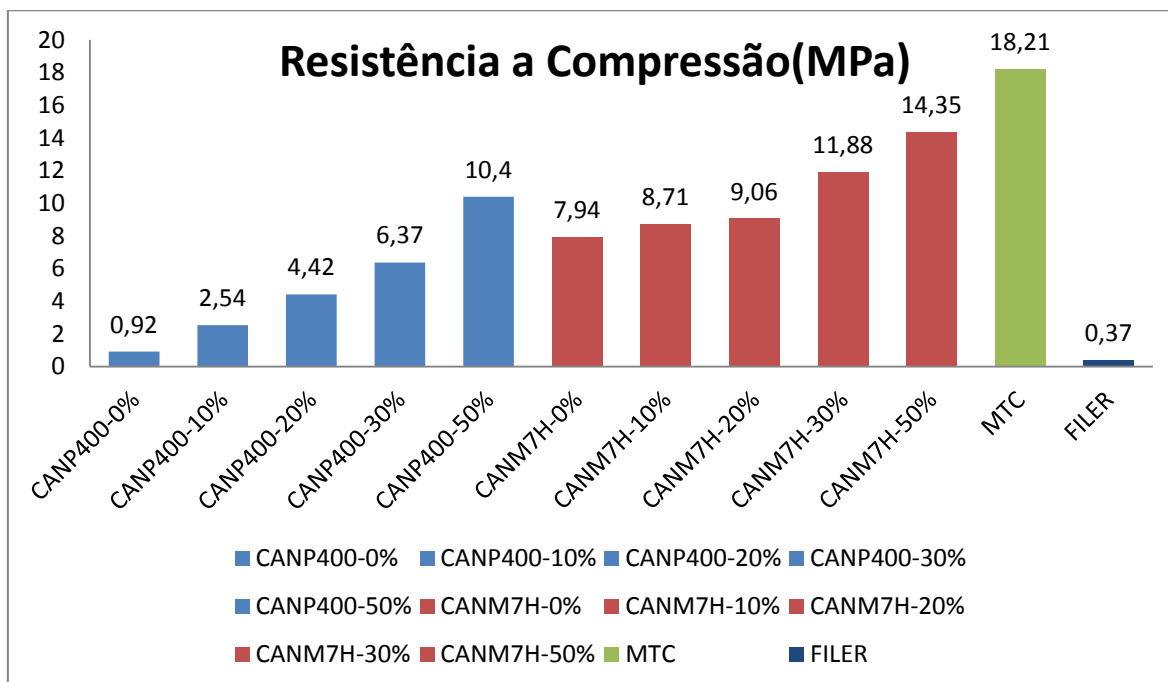
A partir destes quantitativos puderam ser obtidos resultados importantes para a análise das amostras de CBCA em relação a duas propriedades fundamentais neste estudo 1) Resistência a compressão e 2) Índice de Atividade Pozolânica com Cal aos 7 dias (IAC), conforme demonstrados nos Quadros 1 e 2.

A ABNT NBR 5751 : 2015 preconiza a determinação de atividade pozolânica em materiais pozolânicos através do índice de atividade com cal (IAC). O IAC é a resistência à compressão aos 7 dias de argamassas confeccionadas com cal hidratada e o material pozolânico e, segundo a ABNT NBR 12653 : 2012, para que esteja em conformidade deve apresentar um resultado maior ou igual a 6 MPa. Segundo os requisitos desta última Norma, para que os materiais pozolânicos analisados estejam em conformidade com os padrões exigíveis, estes devem apresentar um índice de atividade pozolânica (IAC) maior ou igual a 75%. O valor do IAC tem relação direta com a resistência a compressão obtida das amostras de CBCA, como se pode ver nos valores expostos no Quadro 4.1. Este princípio fundamenta a Equação 4.1.

$$\text{IAC (\%)} = \frac{\text{Resist. compressão}}{6 \text{ Mpa}} \times 100$$

Equação 8

Quadro 1 – Resistência a compressão das amostras de CBCA aos 7 dias.



Fonte: Autor (2017)

A partir valores obtidos para resistência a compressão expostos no Quadro 1 baseados nos parâmetros mínimos exigíveis definidos pela ABNT NBR 5751 : 2015, pode-se entender que todas as amostras de CBCA, seja ela P400 ou M7H, à medida que se incluía em sua matriz os percentuais de metacaulim, seus valores de resistência a compressão aumentaram. Além disso, comparando os resultados das duas cinzas analisadas, a maioria dos resultados da CANM7H foram superiores ao da CANP400, exceto no comparativo com a CANP400-50 como pode ser percebido no gráfico, onde só a partir da inclusão de 30% na CANM7H os resultados se sobrepuseram. Fato que pode ser explicado em função do alto teor de MTC na matriz da amostra de CANP400-50, auxiliar sobremaneira no resultado de resistência a compressão deste material.

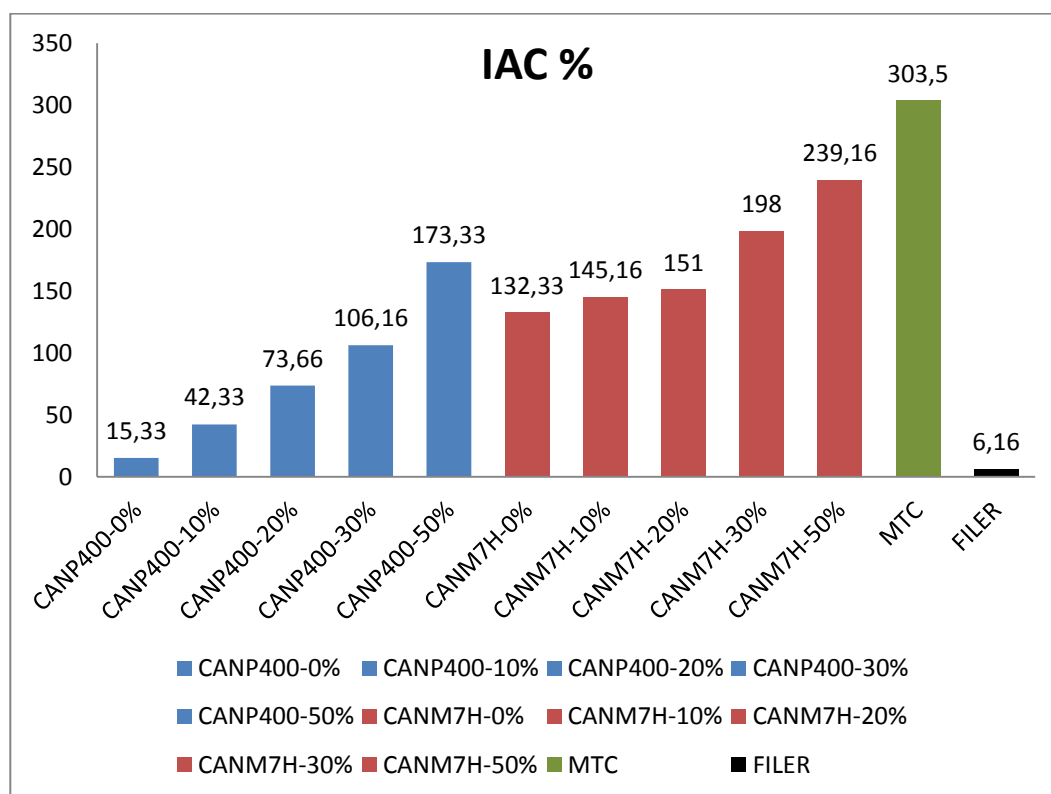
Ademais, os resultados obtidos para CANP400 nos termos de resistência a compressão só foram admissíveis a partir da inclusão de 30 e 50% de MTC em sua matriz. Fato este que não ocorreu para as amostras de CANM7H, onde todos os resultados auferidos atenderam a especificação da norma e deram acima de 6 MPa. Ou seja, tendo sido os resultados para CANM7H superiores a CANP400 pode-se compreender uma relação direta acerca da finura como propriedade importante sobre a resistência a compressão dos materiais. No entanto, quando analisado a resistência da amostra de FÍLER, o valor observado ficou muito abaixo

dos demais, visto que se trata de um material bastante fino. Este fato propõe que, apesar da finura se tratar de um importante parâmetro para caracterização frente ao potencial pozolânico, ela por si só não garante a aplicação do material para esta finalidade, o que torna necessário outras análises mais específicas, a exemplo da DRX.

Já para o resultado de resistência a compressão da MTC de referência, o resultado foi maior do que todos os outros, em função de se tratar de um material consolidado na literatura como pozolânico.

De forma complementar, a partir da análise de resistência a compressão, está a avaliação do Índice de Atividade pozolânica das amostras, tendo em vista que esta avaliação depende da resistência do material, conforme ilustrado na Equação 4.1. Tão logo, com os resultados obtidos pelo IAC tem-se o Quadro 2 a seguir.

Quadro 2 – Índice de Atividade Pozolânica das amostras de CBCA aos 7 dias.



Fonte: Autor (2017)

- 1) Para as análises do Índice de atividade pozolânica da CANP400 com diferentes teores de MTC em sua matriz, levando-se em consideração as condicionantes principais previstos pela ABNT NBR 5751 : 2015 para maior ou igual a 75%, nota-se que,

igualmente como ocorreu para a análise de resistência a compressão, os resultados admissíveis para estes padrões só foram satisfatórios a partir da inclusão de 30 e 50% de MTC.

- 2) Na avaliação do IAC das amostras de CANM7H, nota-se todos os resultados auferidos atenderam as exigências normativas, fato que também ocorreu na análise de resistência. Mesmo, inclusive, para a amostra de CANM7H com 0% de MTC, sugerindo que a finura seja um fator determinante para caracterização nos termos de pozolanicidade de um dado material.
- 3) O Fíler, apesar de ser um material fino e pertencente ao grupo de adições dentro da matriz cimentícia, não apresentou resultados satisfatórios, tanto nos termos de resistência a compressão, como no índice de atividade pozolânica. O que sugere que, mesmo apresentando um alto grau de finura, não têm potencial pozolânico satisfatório para que seja utilizado.
- 4) A MTC de referência novamente apresentou um resultado preponderante aos demais, visto que se trata de um material consolidado no mercado como sendo pozolânico.

A partir dos resultados obtidos em relação a resistência a compressão, proposto pela ABNT NBR 5751 : 2015 e pelas recomendações da ABNT NBR 12653 : 2012, se pode perceber que os melhores resultados foram atribuídos as amostras de CANM7H, os quais puderam ser potencializados com a inclusão de MTC em sua matriz. Tão logo, para confirmação destes resultados e maior entendimento sobre as propriedades pozolânicas das amostras de CBCA, este estudo foi apoiado pela análise termogravimétrica a seguir.

4.3.2 *Análise Termogravimétrica dos materiais de estudo*

A realização da TG ocorreu para algumas associações acerca dos materiais constituintes do sistema CBCA, MTC e CH-I, na tentativa de avaliar os diversos resultados em função de um variado número de configurações, mas principalmente de comparar o comportamento das amostras de CBCA com a de MTC, sendo este último um material comprovadamente pozolânico.

Neste enfoque, a análise termogravimétrica buscou a compreensão do material na forma de pó sem liofilizar, em outros casos avaliou-se o material liofilizado e, a partir do gráfico obtido pela TG, se pode fazer um comparativo entre eles, como forma de avaliá-los em relação uns aos outros. Ou seja, tanto os materiais de referência como CH-I e a MTC foram submetidos a

TG, assim como as amostras CANP400 e CANM7H em seus diversos percentuais de MTC em sua matriz (0, 10, 20, 30 e 50%) em relação à massa de cinza.

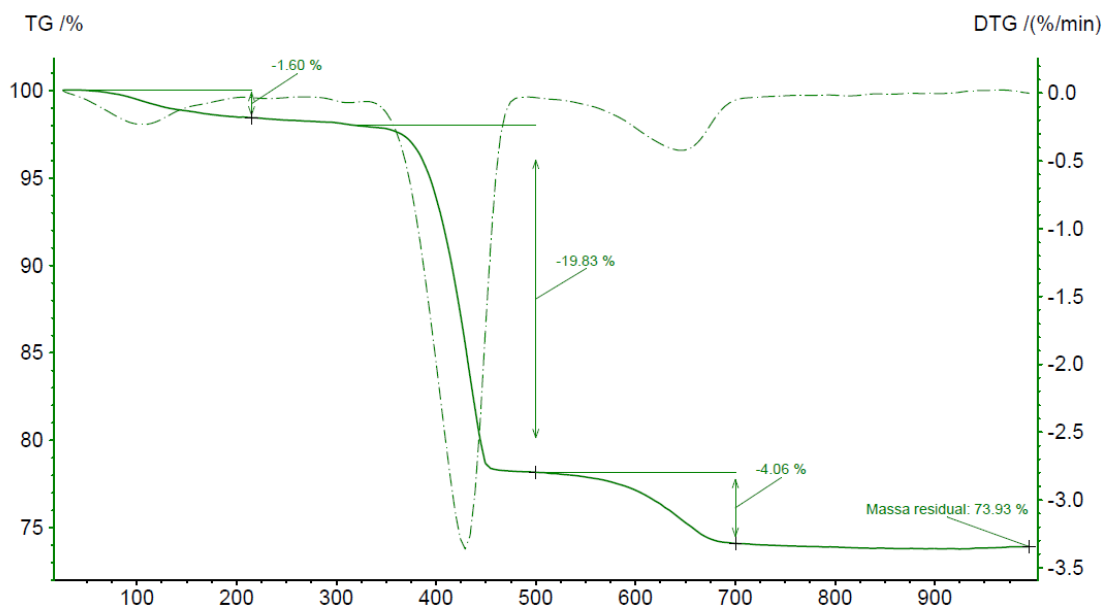
Dentre outras coisas, o principal objetivo desta ampla análise, consiste em avaliar o consumo de portlandita através da análise ternária dos componentes de CBCA associado a CH-I e MTC.

Vale ressaltar que, de acordo com Taylor (1997), a decomposição do hidróxido de cálcio ocorre entre 425°C a 550°C. Desta forma quando ocorre a diminuição do pico neste intervalo de temperatura, é possível a constatação da atividade pozolânica, representando assim, o consumo de hidróxido de cálcio.

Os gráficos a seguir demonstram os resultados da análise Termogravimétrica, acerca do teor de consumo de portlandita, da mistura ternária constituídos de MTC, CH-I e CBCA (CANM7H ou CANP400). São eles:

I. TG Cal Hidratada na forma de pó, sem liofilizar.

Gráfico 9 – TG e DTG da amostra de CH-I, na forma de pó, sem liofilizar.



Fonte: Autor (2017).

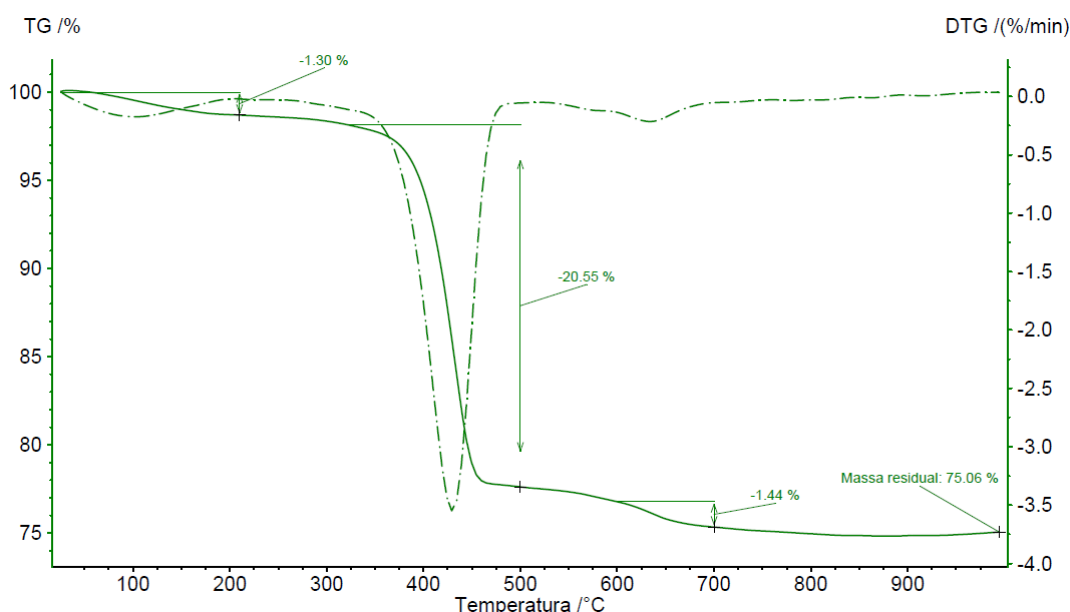
Partindo da leitura dos dados propostos no Gráfico 9 entende-se que;

- 1) Houve uma perda de massa na ordem de 1,60% na faixa de temperatura entre 30 - 215°C. A causa possível provavelmente é em razão da presença da umidade na amostra.

- 2) Novamente perda de massa, num percentual maior que o supracitado, na ordem de 19,83% nas faixas de temperatura de 320 a 500°C, se percebe também neste intervalo que houve a decomposição do hidróxido de cálcio – $\text{Ca(OH)}_2 \rightarrow \text{CaO} + \text{H}_2\text{O}$.
- 3) Com o avanço da temperatura, na faixa entre 500 a 700°C, houve nova perda de massa numa escala de 4,06%. Nesta etapa nota-se também a decomposição de algum tipo de carbonato, provavelmente o carbonato de cálcio. $\text{CaCO}_3 \rightarrow \text{CaO} + \text{CO}_2$.
- 4) Com as sucessivas perdas de massa em virtude do aumento da temperatura, a massa residual final ficou na ordem de 73,93%.

II. TG Cal Hidratada Liofilizada

Gráfico 10 – TG e DTG da pasta de Cal Hidratada liofilizada.

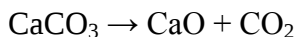


Fonte: Autor (2017).

A partir dos dados propostos no Gráfico 10, entende-se que:

- 1) Houve uma perda de massa 1,30% na faixa de temperatura de 30 a 215°C - Provavelmente em razão da presença da umidade na amostra.
- 2) Com o aumento da temperatura, novamente houve perda de massa, dessa vez na ordem de 20,55%, na faixa de temperatura entre 320 a 500°C. Além disso, percebe-se também a decomposição do hidróxido de cálcio – $\text{Ca(OH)}_2 \rightarrow \text{CaO} + \text{H}_2\text{O}$, um fenômeno dedutivo de reação pozolânica.
- 3) Na faixa de temperatura entre 600 e 700°C houve nova perda de massa igual a 1,44%, tão logo inferior a faixa de temperatura anterior. Nesta etapa há também a

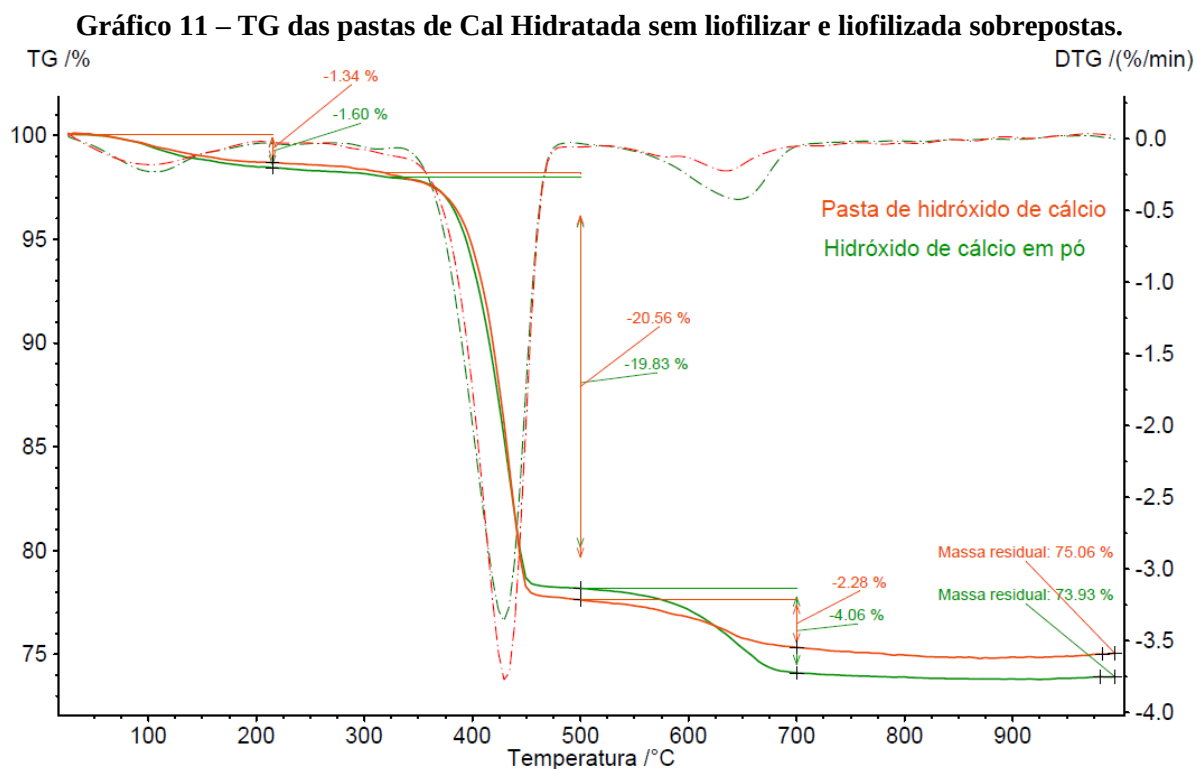
decomposição de algum tipo de carbonato, provavelmente o carbonato de cálcio.



- 4) A partir das sucessivas perdas de massa, decorrentes do aumento de temperatura, a Massa residual final consistiu em 75,06%.

Realizando um comparativo entre os Gráficos 9 e 10 para TG da Cal hidratada sem liofilizar e liofilizada respectivamente, tem-se o Gráfico 11 a seguir:

III. TG Cal hidratada liofilizada e não liofilizada, sobrepostas.



Fonte: Autor (2017).

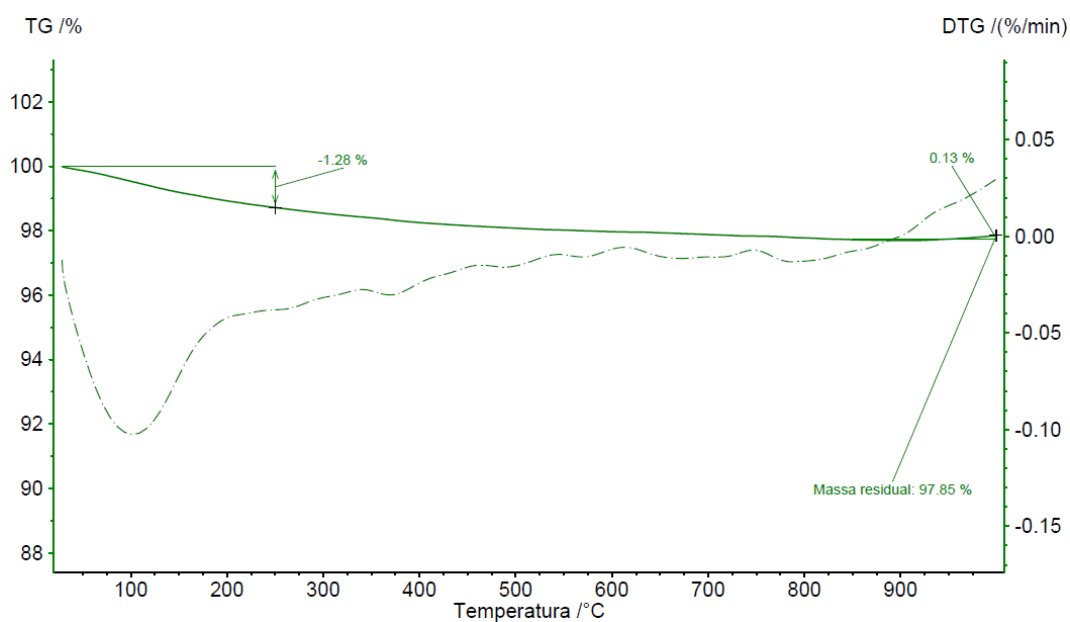
A partir da análise do Gráfico 11, nota-se que a amostra de pasta de hidróxido de cálcio pura que passou pelo processo de congelamento e liofilização apresenta perdas de massa maiores do que no resultado da termogravimetria do hidróxido de cálcio em pó, exceto no pico referente a umidade superficial (em torno 100°C). Esta diminuição da perda de massa no pico referente ao hidróxido de cálcio (em torno 430°C) da amostra em pó quando comparada à amostra em pasta, indica que durante o armazenamento ou preparo ocorreu a carbonatação do

hidróxido de cálcio, corroborado pelo aumento da quantidade de carbonato de cálcio da amostra em pó (pico em torno de 635°C).

Além disso, os resultados também indicam que o preparo das amostras foi eficiente no propósito de parar a hidratação e de impedir a carbonatação dos produtos hidratados. Ressalta-se a presença de carbonatos originários no hidróxido de cálcio utilizado nesta pesquisa, mas que o preparo adequado impediu o seu aumento. Isto é importante em razão de uma possível carbonatação vir a se confundir com a reação pozolânica, pois, ambas interferem na quantidade de hidróxido de cálcio.

IV. Metacaulim em pó, sem liofilizar.

Gráfico 12 – TG Metacaulim na forma de pó, sem liofilizar.



Fonte: Autor (2017).

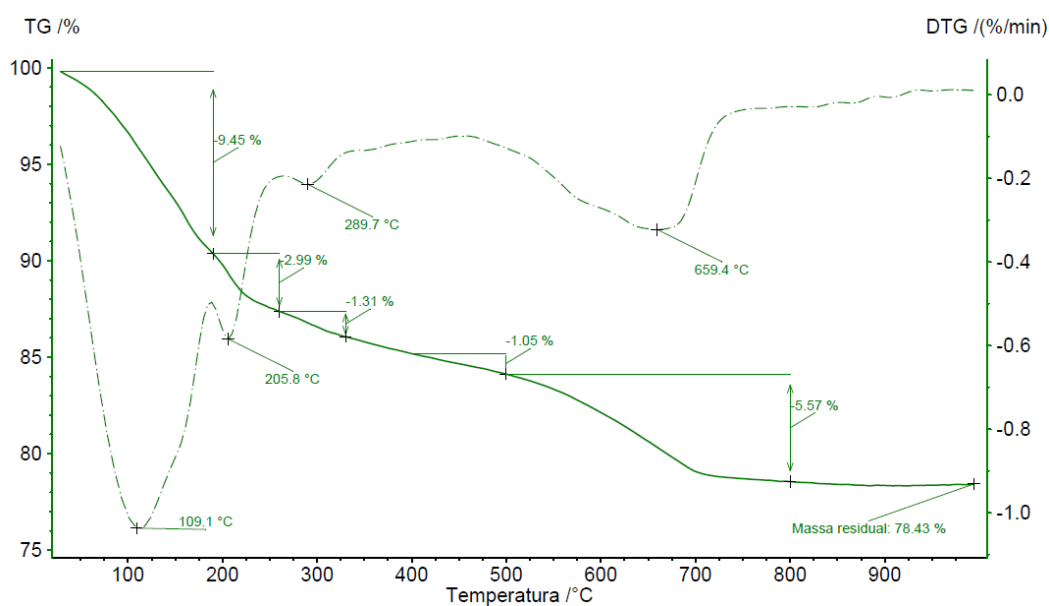
A partir dos dados expostos no Gráfico 12 pode-se notar alguns dados importantes, são eles:

- 1) Houve uma perda de massa compreendida em 1,28% na faixa de temperatura entre 30 - 250°C. Provavelmente em razão da presença da umidade na amostra.

- 2) Na faixa de temperatura entre 850-1000 °C se pode notar um ganho de massa. A razão disso, dentre algumas possibilidades, pode ser originado da fusão ou, interação com o gás utilizado na purga.
- 3) Com o término do ensaio, a massa residual consistiu em 97,85%.

V. Pasta de Metacaulim + Cal hidratada liofilizada

Gráfico 13 – TG da Pasta de metacaulim + Cal hidratada liofilizada.



Fonte: Autor (2017).

A partir dos resultados da análise termogravimétrica, se pode notar no Gráfico 13, para pasta de metacaulim com inclusão de cal hidratada liofilizada, os seguintes parâmetros:

- 1) Perda de massa compreendida em 9,45% na faixa de temperatura entre 30-190°C. Esta perda de massa é referente ao silicato de cálcio hidratado C-S-H. Identifica-se na curva DTG um pico que corresponde ao C-S-H em torno de 109 °C.
- 2) Nova perda de massa, desta vez equivalente a 2,99% na faixa de temperatura entre 190-260°C. Perda de massa referente a fases aluminatos, provavelmente o Aluminato de cálcio hidratado C_4AH_{13} . Identifica-se na curva DTG um pico que corresponde ao Aluminato de cálcio hidratado em torno de 205 °C.

- 3) Com o aumento da temperatura, desta vez na faixa de 260 a 330°C, ocorreu uma nova Perda de massa, na ordem de 1,31%, referente a fases aluminatos, provavelmente a gellenita hidratada (C_2ASH_8). Identifica-se na curva DTG um pico que corresponde a gellenita em torno de 290 °C.
- 4) Última perda de massa, na ordem de 1,31%, ocorrida na faixa entre 500 e 800°C. Referente a carbonatos, provavelmente um carboaluminato, como pode ser também em razão de carbonatos originários do hidróxido de cálcio utilizado (Figuras 4.8 e 4.9). Identifica-se na curva DTG um pico que corresponde ao carbonato em torno de 660 °C. Ao final da análise, a massa residual ficou na ordem de 78,43%.

Ressalta-se a total ausência do pico referente ao hidróxido de cálcio, fato este que confirma a alta reação pozolânica do metacaulim utilizado nesta pesquisa.

VI. Comparativo da pasta MTC+CH versus Pasta CH liofilizada

Gráfico 14a – Comparativo da pasta de MTC + CH versus TG da Pasta de CH liofilizada.

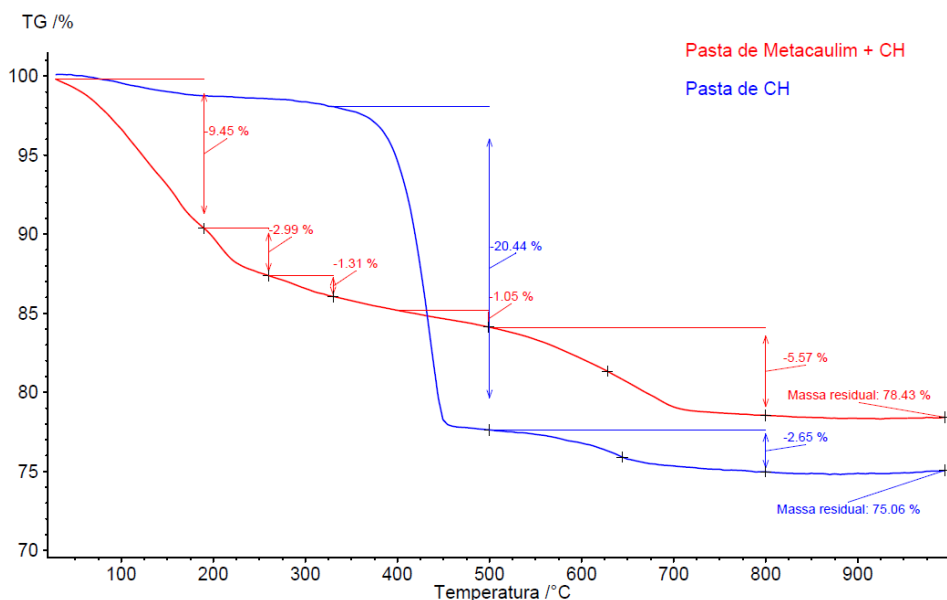
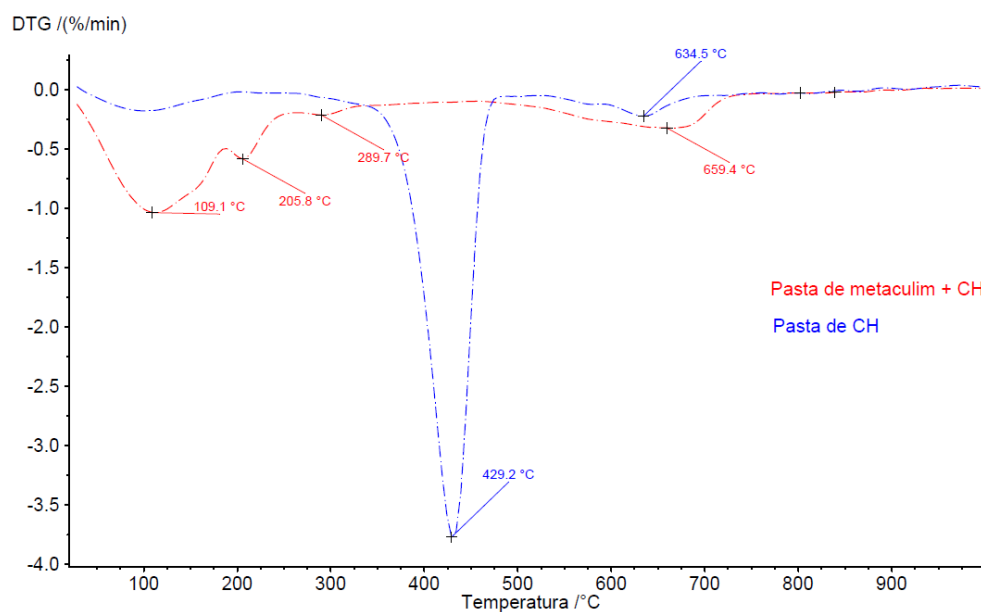


Gráfico 14b – Comparativo da pasta de MTC + CH versus TG da Pasta de CH liofilizada.

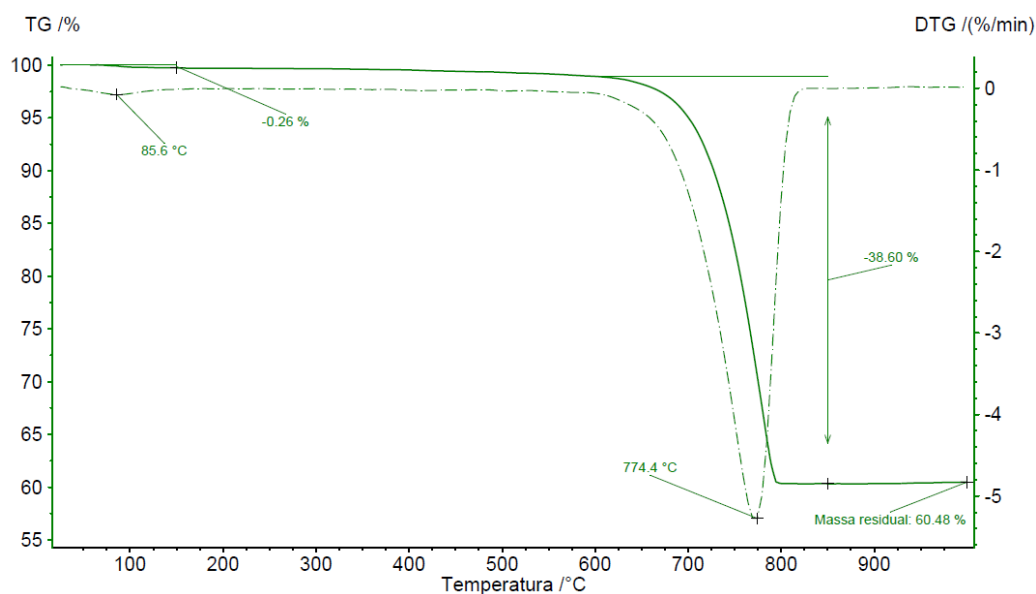


Fonte: Autor (2017)

Pela descrição do Gráfico 14ab, nota-se uma elevada reação pozolânica do metacaulim, com o completo desaparecimento do pico do hidróxido de cálcio.

VII. Fíler em pó, sem liofilizar.

Gráfico 15 – Fíler em pó sem liofilizar



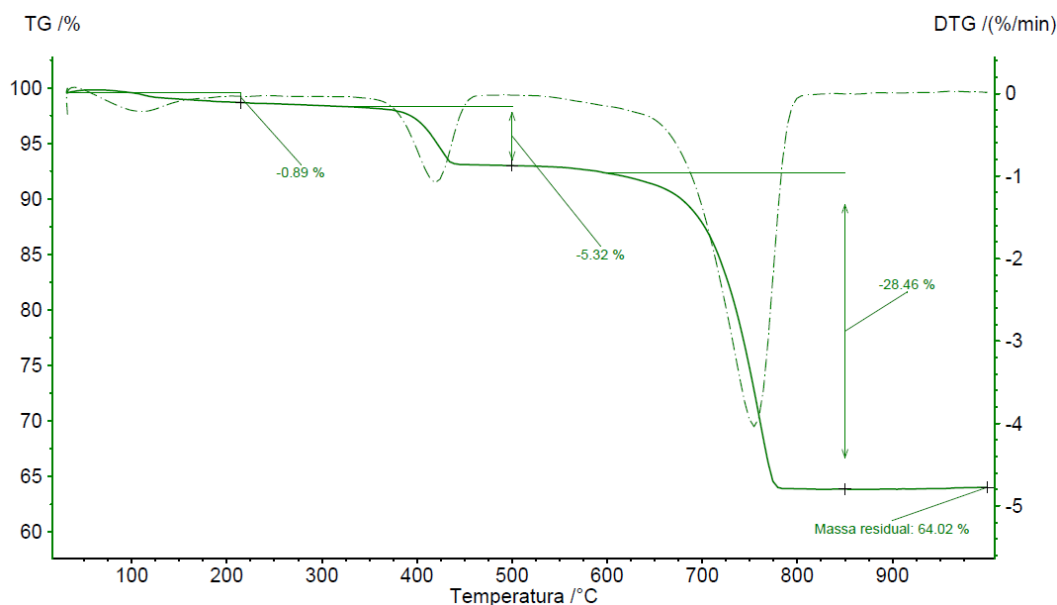
Fonte: Autor (2017)

A partir do Gráfico 15, algumas informações podem ser analisadas, são elas:

- Houve uma perda de massa na ordem de 0,26%, ocorrida na faixa de temperatura entre 30 - 150°C. Provavelmente em razão da presença da umidade na amostra.
- Com o aumento da temperatura sobre a amostra houve uma nova perda de massa, esta na ordem de 38,60%, faixa de temperatura de 600 a 850°C. Nesta fase houve a decomposição do carbonato de cálcio. $\text{CaCO}_3 \rightarrow \text{CaO} + \text{CO}_2$
- Ao final da análise a massa residual ficou compreendida em 60,48%.

VIII. Pasta de Fíler + CH liofilizada

Gráfico 16 – TG da Pasta de Fíler + CH liofilizada.



Fonte: Autor (2017)

A partir do Gráfico 16 pode-se fazer as seguintes análises:

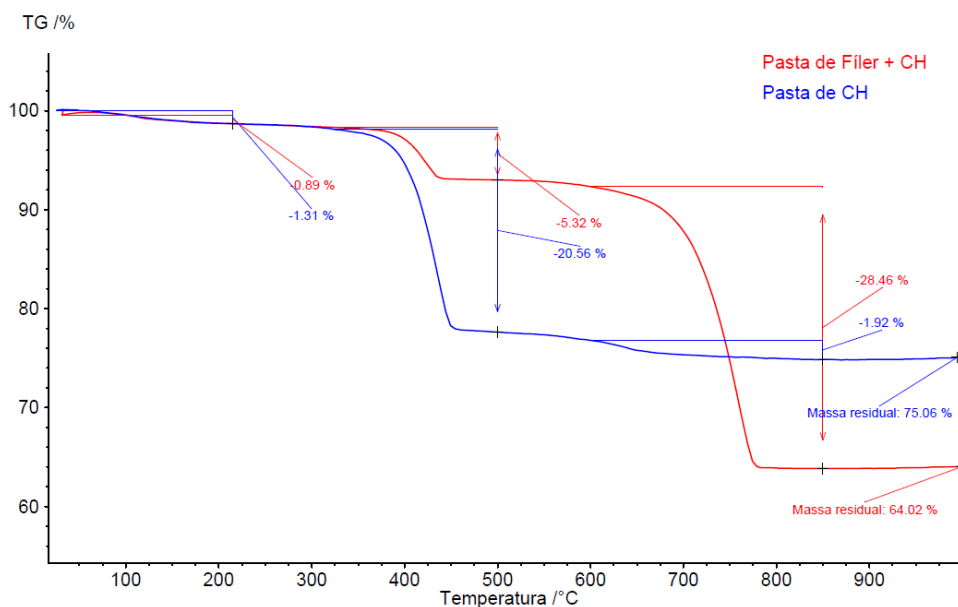
- Houve uma perda de massa na ordem de 0,89 % na faixa de temperatura entre 30-215°C. Provavelmente em razão da presença da umidade na amostra.
- Com o avanço da temperatura, houve nova perda de massa, esta na ordem de 5,32 % na faixa de temperatura entre 320 e 500°C. Decomposição do hidróxido de cálcio – $\text{Ca}(\text{OH})_2 \rightarrow \text{CaO} + \text{H}_2\text{O}$

- c) Na faixa de temperatura entre 600-850°C houve mais uma perda de massa, compreendida em 28,46 %. Nesta etapa houve também a decomposição do carbonato de cálcio. $\text{CaCO}_3 \rightarrow \text{CaO} + \text{CO}_2$
- d) A Massa residual ao final da análise permaneceu na ordem de 64,02 %.

IX. Comparativo da pasta de Fíler + CH versus Pasta CH liofilizada

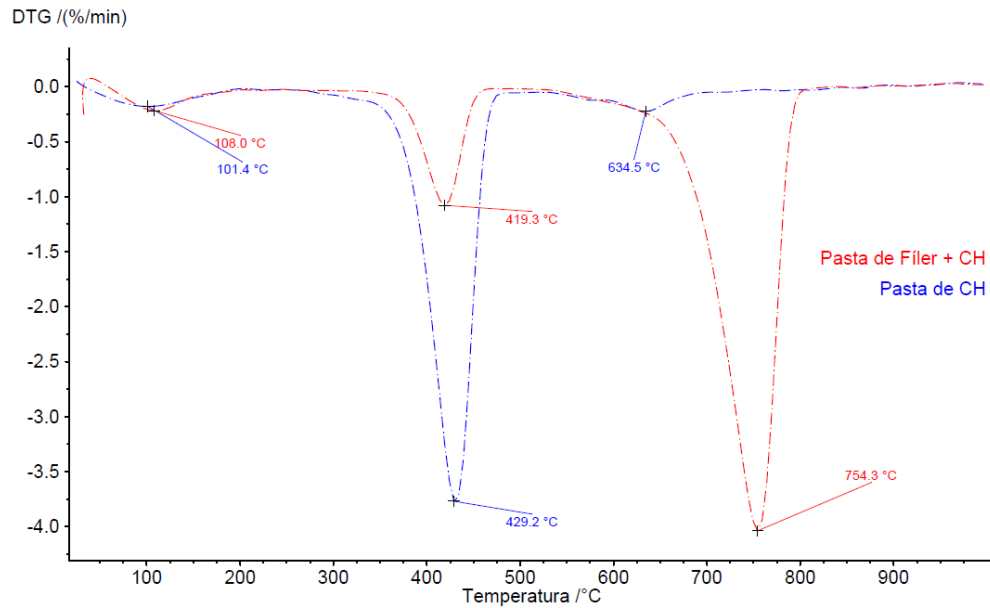
Conforme se pode observar no Gráfico 17ab, os resultados a partir do comparativo entre os resultados indicam que não há reação pozolânica do fíler calcário utilizado, conforme esperado, visto que o mesmo foi utilizado como referência.

Gráfico 17a – DTG comparativo da pasta de Fíler+CH versus Pasta CH liofilizada



. Fonte: Autor (2017)

Gráfico 17b – TG comparativo da pasta de Fíler+CH versus Pasta CH liofilizada.



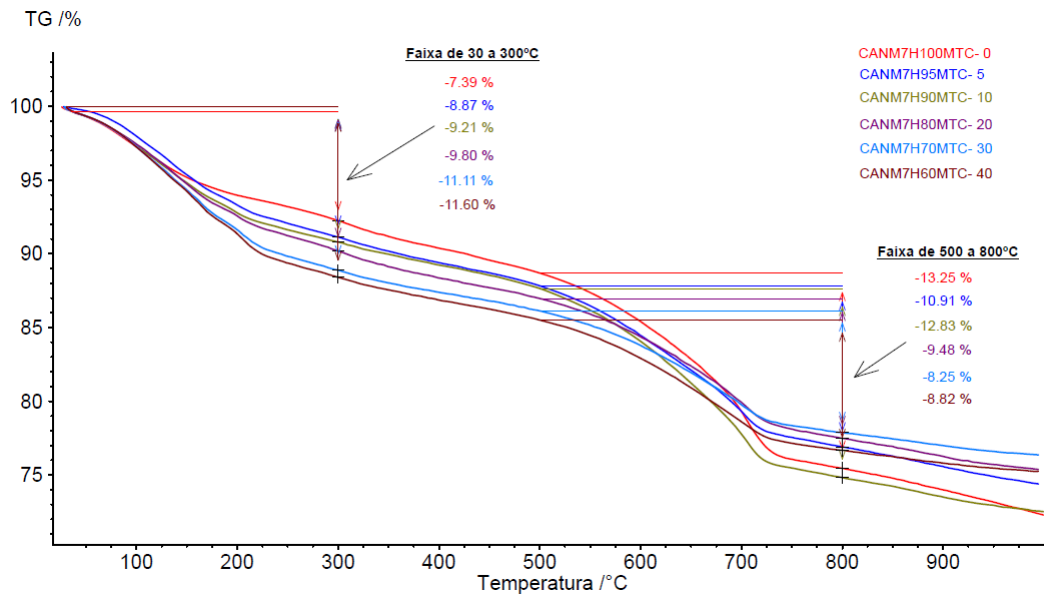
Fonte: Autor (2017)

Percebe-se a ocorrência da diminuição do pico do hidróxido de cálcio pela óbvia razão da utilização da menor quantidade de hidróxido de cálcio quando para a composição da pasta de fíler. Em uma suposição simplificada, na pasta de fíler com a inclusão de hidróxido de cálcio na matriz temos em torno de 29,39% em massa de hidróxido de cálcio, como na pasta composta apenas por hidróxido de cálcio temos uma perda de massa de 20,56%, temos então uma estimativa de 6,04 % na pasta de fíler mais hidróxido de cálcio. Esta estimativa está coerente visto que o resultado apresentado na termogravimetria foi igual 5,32%.

X. Análise comparativa entre pastas de CANM7H + CH

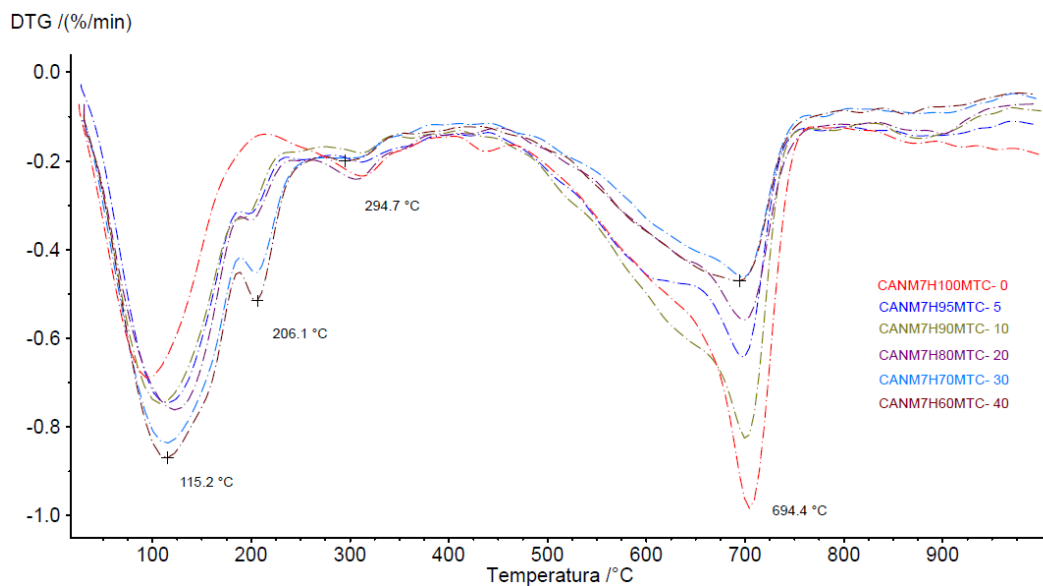
Os resultados auferidos na análise concernentes as amostras de CANM7H estão demonstrados no Gráfico 18ab a ver:

Gráfico 18a – Comparativo TG e DTG das amostras de CANM7H com diferentes percentuais de MTC.



Fonte: Autor (2017)

Gráfico 18b – Comparativo TG e DTG das amostras de CANM7H com diferentes percentuais de MTC.



Fonte: Autor (2017)

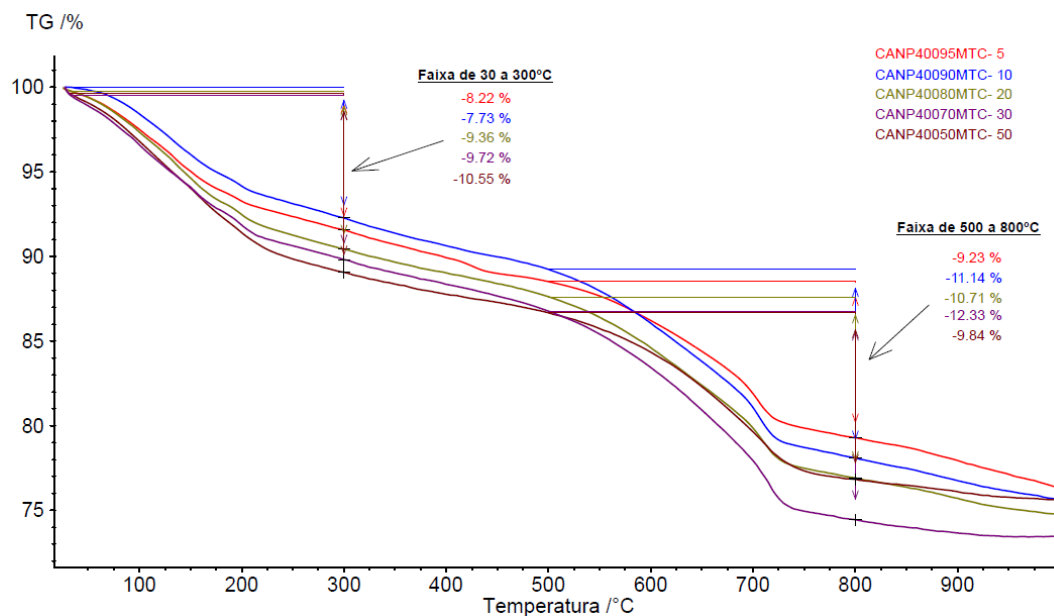
Levando em consideração os dados expostos no Gráfico 18ab, os resultados apresentados na análise termogravimétrica do sistema binário da CBCA mais hidróxido de cálcio corroboram para confirmar o efeito pozolânico da CBCA quando moída por 7 horas, com o completo desaparecimento do pico de hidróxido de cálcio e aparecimento do pico referente ao C-S-H. Assim como a melhoria do potencial pozolânico da CBCA moída por 7 horas quando composição com o metacaulim, demonstrado pelo aumento da perda de massa referente ao C-S-H mais fase aluminatos (faixa de 30 a 300°C).

Ocorreu também a formação de carbonatos (faixa de 500 a 800°C), porém, seriam necessárias mais determinações (utilizando difração de raios-X, por exemplo) para explicar o aparecimento desta fase. A principal suposição seria a carbonatação do hidróxido de cálcio, porém, nos ensaios em pasta apenas com hidróxido de cálcio a carbonatação não ocorreu. É possível que no decorrer da reação pozolânica, a dissolução do material pozolânico tenha disponibilizado alguma quantidade de íons de alumínio, propiciando a formação de carboaluminatos. Percebe-se que quanto maior o potencial pozolânico do sistema binário (em ordem de substituição de CBCA por metacaulim), menor a formação de fases carbonáticas, indicando que o aumento da intensidade da reação pozolânica evita a formação do carboaluminato e aumenta a formação do aluminato de cálcio hidratado (em torno de 205°C) e da gellenita hidratada (em torno de 295°C).

XI. Análise comparativa entre pastas de CANP400 + CH

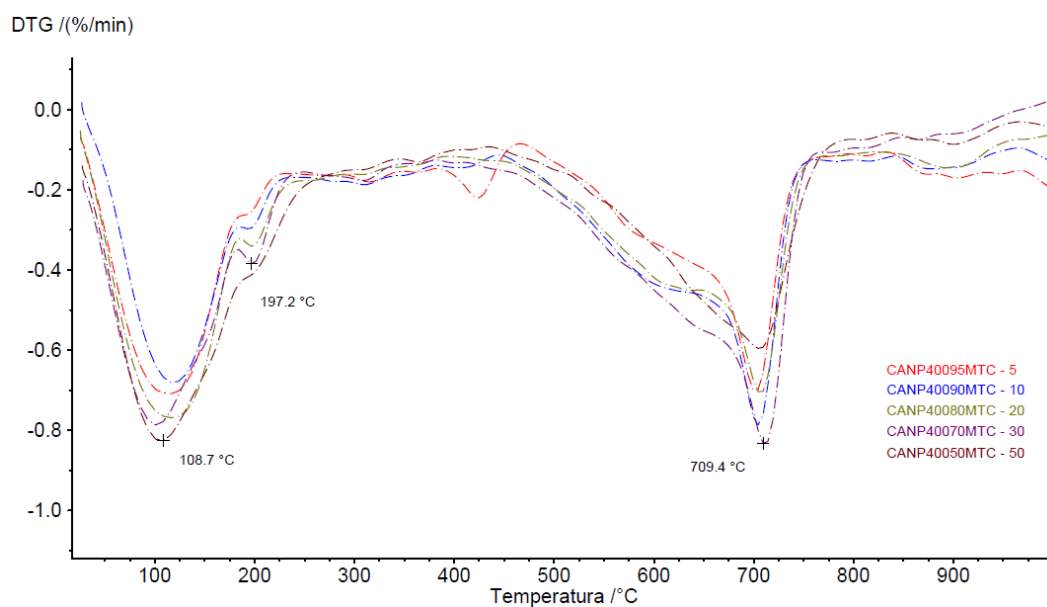
Os resultados apresentados na análise termogravimétrica do sistema binário da CBCA mais hidróxido de cálcio corroboram para confirmar que o efeito pozolânico da CBCA quando peneirada na malha 400 (325µm) só é completamente efetivo quando da adição do metacaulim, pois ocorre o completo desaparecimento do pico de hidróxido de cálcio e aparecimento do pico referente ao C-S-H. Quando a mistura utiliza 95% de CBCA peneirada mais 5% de metacaulim, ainda é possível observar a presença do pico de hidróxido de cálcio. Em razão de problemas técnicos não foi possível obter o resultado da termogravimetria da CBCA sem a adição de metacaulim. Tais observações podem ser analisadas no Gráfico 19ab a seguir:

Gráfico 19a – Comparativo TG e DTG das amostras de CANP400 com diferentes percentuais de MTC.



Fonte: Autor (2017)

Gráfico 19b – Comparativo TG e DTG das amostras de CANP400 com diferentes percentuais de MTC.



Fonte: Autor (2017)

Assim como na CBCA moída por 7 horas, a adição do metacaulim melhora e viabiliza o potencial pozolânico da CBCA apenas peneirada, demonstrado pelo aumento da perda de massa referente ao C-S-H mais fase aluminatos (faixa de 30 a 300°C). Porém, quando comparado o percentual referente a esta faixa das CBCA peneira (perda máxima de 10,55%) e a moída (perda máxima de 11,60%) pode se afirmar que a CBCA moída tem maior reação pozolânica. Sendo este comportamento confirmado pelos resultados obtidos nas mesmas formulações em argamassas realizada conforme a ABNT NBR 5751 : 2015.

5 CONCLUSÕES

Através dos resultados obtidos pela caracterização química, física e de avaliação da pozolanicidade do material, se pode estruturar seu embasamento para que fosse possível tomá-lo como material pozolânico.

Na avaliação das amostras a partir das propriedades químicas, através do método de difração de Raio-X, bem como pelas diretrizes prescritas na ABNT NBR 5751 : 2015, foi possível analisar o Índice de Atividade Pozolânica a elas relacionadas. Tão logo, pode-se notar pelos resultados obtidos, que houve um acentuado consumo de portlandita na reação, principalmente se comparado ao pico de hidróxido de cálcio. Esta observação constitui uma das condicionantes para avaliar um dado material, que neste caso se trata da CBCA, como material pozolânico. Onde se pode perceber através dos resultados obtidos, que os parâmetros essencialmente importantes foram atendidos.

Além desta avaliação química, com o propósito de validar tais investigações, foram também realizados ensaios físicos, através de diferentes métodos, sejam eles: 1) Análise da área específica através do método de Blaine; 2) Análise da área superficial através do BET; 3) Massa específica real através do multiplicômetro a gás hélio. Nestes três avaliações citadas, os resultados obtidos acerca dos parâmetros de pozolanicidade, assim como aconteceu na caracterização química, novamente estiveram dentro do padrão exigido, principalmente para o ensaio de massa específica, onde os resultados auferidos para CBCA foram muito próximos dos obtidos para a MTC de referência.

De forma complementar, foram realizadas as avaliações de atividade pozolânica a partir da ABNT NBR 5751 : 2015 (para resistência a compressão), onde os resultados obtidos deram respaldo para avaliação do índice de atividade pozolânica. Logo, tanto para o ensaio de resistência, quanto de IAC, se pode observar que os melhores resultados obtidos nestas análises foram se deram nas amostras de CANM7H, fato que pode ser atribuído a maior finura deste material em relação a CANP400.

Na tentativa de validar a cinza do bagaço de cana como um material pozolânico, uma última avaliação foi realizada neste trabalho, através da análise termogravimétrica (TG). Para os resultados expostos nota-se que, tanto a CANP400, quanto a CANM7H, apresentaram características satisfatórias frente aos parâmetros exigíveis. Além disso, se pode notar também

que, a inclusão de percentuais variáveis de MTC na matriz de CBCA pode favorecer sobremaneira acerca do desaparecimento dos picos de hidróxido de cálcio, o qual, segundo a literatura, esta consiste ser uma das principais condicionantes para que um material possa ser tido como pozolânico.

Ou seja, tanto pelos critérios químicos, físicos e de caracterização pozolânica, os resultados da CBCA foram satisfatórios, tendo em vista que os melhores resultados foram obtidos para a amostra de CANM7H.

Vale salientar que as amostras não sofreram nenhum tipo de tratamento térmico, o que propõe ser um ponto positivo, o que reforça que a CBCA avaliada se mostrou dentro dos padrões exigíveis para ser classificada como material pozolânico, mesmo que em sua condição mais natural.

5.1 Proposta para trabalhos futuros

- Avaliação da matriz ternária através do método de Difração de Raio-X
- Utilização do Microscópio Eletrônico de Varredura (MEV) para avaliar a interação da CBCA na matriz cimentícia.
- Avaliar as características da CBCA em diferentes graus de moagem, dispensando ou não outros tipos de tratamento, a exemplo do térmico.
- Avaliar a pozolanicidade de cinzas oriundas da queima de resíduos agroindustriais pelo método de condutividade elétrica.
- Estudo aplicado em concreto e argamassa com incorporação de CBCA para análise de durabilidade.

REFERÊNCIAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 12653: Materiais pozolânicos – Especificação. Rio de Janeiro, 2012.

_____. 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, 2015.

_____. NBR 5752: Materiais pozolânicos - Determinação de atividade pozolânica com cimento Portland - Índice de atividade pozolânica com cimento. Rio de Janeiro, 2014.

_____. NBR 5753: Cimento Portland - Ensaio de pozolanicidade para cimento Portland pozolânico. Rio de Janeiro, 2016.

_____. NBR 7215: Cimento Portland - Determinação da resistência à compressão. Rio de Janeiro, 1997.

_____. NBR NM 67: Concreto - Determinação da consistência pelo abatimento do tronco de cone. Rio de Janeiro, 1998.

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

CASTRO, J. N. T. et al. **Influência da cinza do bagaço da cana em concretos**. 54 Congresso Brasileiro de Concreto - CBC 2012, 2012. Macéio - Alagoas. Anais. p.11.

CHUSILP, N., JATURAPITAKKUL, C. e KIATTIKOMOL, K. Utilização do bagaço de cana de açúcar como adição pozolânica no concreto. **Construction and Building Materials**. 23, 3352-3358, 2009.

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, G.C.; TOLEDO FILHO, R.D.; FAIRBAIRN, E.M.R. **Caracterização de cinza do bagaço de cana-de-açúcar para emprego como pozolana em materiais cimentícios**. Química Nova, Vol. 32, No. 1, pág. 82-86, 2009.

CUNHA M. F.; FORTI B.A.; SILVA B.I. **Tendências da normalização de metacaulim para uso em concretos**. In: REUNIÃO ANUAL DO IBRACON 52 - NOVAS TECNOLOGIAS DO CONCRETO PARA O CRESCIMENTO SUSTENTÁVEL, outubro 2010, Ceará. Anais: IBRACON 2010, p46.

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.

FARIAS, E. C. D. **Estudo comparativo da utilização de cinza da biomassa de cana-de-açúcar e de Metacaulim em concretos autoadensáveis**. Ibracon, 2012.

FEITOSA, A.C.; DANTAS, B.B.; SANTANA, A.; COSTA, D.B.; COSTA, A.C.M.F. Influência do processo de moagem na estrutura e morfologia de $ZnAl_2O_4$ e no desempenho catalítico na reação de transesterificação metílica do óleo de soja. **Revista Eletrônica de Materiais e Processos**, v. 7.3, p. 165-173, 2012.

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, E.; VALENCIA, E. Caracterização da Cinza do bagaço de cana como material pozolânico na construção: Temperatura de calcinação e parâmetros cinéticos. **ScienceDirect**, v. 37, p. 533-538, 2007.

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

GAVA, G.P.; PRUDENCIO, L.R. Pozzolanic activity tests as a measure of pozzolans' performance. Part 1. **Magazine Of Concrete Research**, v.59, n.10, p.729–734, 2007a.

GOÉS, P. B. **Análise da pozzolanicidade por meio da difração de raio-x em pastas de cimento portland e com substituição por cinza do bagaço de cana-de-açúcar**. Dissertação de mestrado, Universidade Federal de Pernambuco. Caruaru, 2016.

HELENE, P.R.L.; TERZIAN, P. **Manual de dosagem e controle do concreto**. São Paulo: PINI, SENAI, 1992.

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

LIMA, J. S. . **Emprego da cinza do bagaço da cana-de-açúcar (in natura) como adição ao cimento Portland em argamassas**. 54 Congresso Brasileiro de Concreto - CBC 2012, 2012. Macéio – Alagoas. Anais. p.10.

LIMBACHIYA, M. C. Engenharia e propriedades da durabilidade do concreto. **Construction and Building Materials**, v. 23, n. 2, p. 1078-1083, 2009. Disponível em: < <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0950061808001499> >.

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

MASSAZZA, F. Pozzolana e cimentos pozzolânicos. In: Hewlett, P.C. (ed.), **Lea's Chemistry of Cement and Concrete**, 4th edition, Arnold Publishers londos, pp. 485-500, 1998.

MEDINA, E.A. **Pozolanicidade do metacaulim em sistemas binários com cimento Portland e hidróxido de cálcio**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 151p, 2011.

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

NETO, A. A. **Influência de aditivos redutores e compensadores de retração em argamassas e pastas com cimento de escória ativada**. Tese (Doutorado) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2007.

METACAULIM BRASIL. Pesquisa no Estado de São Paulo. Disponível em: <<http://www.metacaulim.com.br/impermeabilizantes-metacaulim-hp-ultra.html>> Acesso em fevereiro de 2016.

MONTGOMERY, D.C. **Desenho e análises experimentais**. 4 nd, John Wiley, 1997.

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.

ROCHA, G.G.N. **Caracterização microestrutural do metacaulim de alta reatividade**. Dissertação de mestrado. Universidade Federal de Minas Gerais – Escola de engenharia, 2005.

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 outubro 2016.

SATA V.; TANGPAGASIT, J.; JATURAPITAKKUL, C.; CHINDAPRASIRT, P. Efeito da razão da reação pozolânica em biomassa na matriz do cimento Portland. **Cement e Concrete Composites**, v.34, p. 94-100, 2012.

SILVA, E.J. **Utilização do método de condutividade elétrica para análise da pozolanicidade da cinza do bagaço de cana-de-açúcar**. Dissertação de mestrado, Universidade Federal de Pernambuco. Caruaru, 2016.

SNIC - Sindicato Nacional da Indústria do Cimento. **Relatório Anual de 2013**. Disponível em: <<http://www.snic.org.br>>. Acesso em dezembro de 2016.

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

TASHIMA, M.M; FIORITI, C.F; AKASAKI, J.L; BERNABEU, J.P; SOUSA, L.C; MELGES, J.P.L. **Cinza de casca de arroz (CCA) altamente reativa: método de produção e atividade pozolânica**. Ambiente construído, Porto Alegre, v.12, n.2, pag. 151–163, 2012.

ÚNICA - União da Agroindústria Canavieira do Estado de São Paulo (2004) Disponível na internet: <<http://www.unica.com.br>>. Acesso em janeiro 2017.

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.

WANG, H.-Y.; HUANG, W.-L. Durabilidade de concreto autoadensável com adições de vidro reciclado. **Construction and Building Materials**, v. 24, n. 6, p. 1008, 6// 2010. ISSN 0950-0618. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0950061809004036>>.

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.