Universidade Federal de Pernambuco
Centro Acadêmico do Agreste
Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil e Ambiental

PABLO BORBA DE BARROS GÓES

ANÁLISE DA POZOLANICIDADE POR MEIO DA DIFRAÇÃO DE RAIO-X EM PASTAS DE CIMENTO PORTLAND E COM SUBSTITUIÇÃO POR CINZA DO BAGAÇO DE CANA-DE-AÇÚCAR.

Caruaru

2016

Universidade Federal de Pernambuco
Centro Acadêmico do Agreste
Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil e Ambiental

ANÁLISE DA POZOLANICIDADE POR MEIO DA DIFRAÇÃO DE RAIO-X EM PASTAS DE CIMENTO PORTLAND E COM SUBSTITUIÇÃO POR CINZA DO BAGAÇO DE CANA-DE-AÇÚCAR.

Dissertação apresentado ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil e Ambiental, como requisito para início da Dissertação de Mestrado. **Área de concentração:** Estruturas & Materiais. **Linha de Pesquisa:** Materiais e componentes da construção civil.

Discente: Pablo Borba de Barros Góes
Orientador: D.Sc. Antônio Acacio de Melo Neto

Caruaru
2016

Catalogação na fonte:
Bibliotecária – Marcela Porfírio CRB/4 - 1878

G598a Góes, Pablo Borba de Barros.
Análise da pozolanicidade por meio da difração de raio-x em pastas de cimento portland e com substituição por cinza do bagaço de cana-de-açúcar. / Pablo Borba de Barros Góes. – 2016.
90f.: il.; 30 cm.

Orientador: Antônio Acacio de Melo Neto.
Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Pernambuco, CAA, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil e Ambiental, 2016.
Inclui Referências.

1. Construção civil – Materiais. 2. Cana-de-açúcar. 3. Raio X - Difração. I. Melo Neto, Antônio Acacio de (Orientador). II. Título.

620CDD (23. ed.) UFPE (CAA 2016-260)

UNIVERSIDADE FEDERAL DE PERNAMBUCO

Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil e Ambiental

Área de Concentração em Estruturas e Materiais

A comissão examinadora da Defesa de Dissertação de Mestrado

ANÁLISE DA POZOLANICIDADE POR MEIO DA DIFRAÇÃO DE RAIO-X EM PASTAS DE CIMENTO PORTLAND E COM SUBSTITUIÇÃO POR CINZA DO BAGAÇO DE CANA-DE-AÇUCAR.

Defendida por

PABLO BORBA DE BARROS GÓES

Considera o candidato APROVADO

Caruaru, 25 de agosto de 2016

_____

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

_____

D.Sc Humberto Correia Júnior
(examinador interno)

_____

D.Sc Paulo de Araújo Regis
(examinador externo)

AGRADECIMENTOS

Gostaria de agradecer primeiramente a Deus pois sem ele nada é possível.

Aos meus pais Francisco de Assis e Maria de Fátima, irmão Miguel Borba, família e amigos que me acompanharão ao longo dos anos e tanto contribuirão em minha vida.

A todos os professores que durante anos contribuirão para minha formação acadêmica e profissional.

Ao meu orientador o professor D.Sc. Antônio Acácio de Melo Neto por ter partilhado comigo esse projeto e desafio e ter me guiado ao longo de toda essa jornada que foi o mestrado.

Aos professores Humberto Correia de Lima Júnior eFernanda Wanderley Correa de Araujo que também me acompanharame auxiliaram nesta tarefa.

A todos os professores do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil e Ambiental da UFPE – CAA e que contribuirão com o seu louvável seu trabalho de partilhar o conhecimento com seus alunos.

Os técnicos de laboratório da UFPE campus caruaru, Everton Rodrigues e Fabíola Franca que nos acompanharam ao longo de todo o processo de produção do material, bem como os técnicos do Cetene que realizarão os diversos ensaios utilizados nesta pesquisa.

Aos alunos de graduação do curso de engenharia civil da UFPE campus caruaru, Sérgio Manoel e Ítalo Lucas, que ajudaram na moagem e calcinação das cinzas.

Aos membros do grupo de pesquisa da cinza do bagaço da cana-de-açúcar os mestrandos Emerson José da Silva e Lawrence Francisco Costa, bem como a doutoranda Marilia Neves Marinho.

Aos demais alunos do curso de mestrado que estiveram comigo durante as disciplinas.

E por fim a todos aqueles que direta ou indiretamente contribuíram para a realização deste trabalho, gostaria de deixar para todos os meus mais sinceros agradecimentos.

RESUMO

A incorporação de resíduos diversos dentro de seus processos produtivos tem sido uma tendência na construção civil, esse processo visa a diminuição dos custos de produção e da deposição de resíduos no meio ambiente, dentro desta ótica as cinzas vegetais tem sido bastante estudadas devido as suas possíveis propriedades pozolânica. Para este estudo foi utilizada a cinza do bagaço da cana-de-açúcar (CBCA) proveniente do estado de Pernambuco, esse material foi submetido a um processo de secagem em estufa a 100°C e um peneiramento para retirar matérias contaminantes como folhas, madeiras e outros. O material foi dividido em quatro partes e submetido a um processo de calcinação nas temperaturas de 300°C, 400°C, 500°C e 600°C e chamadas de CB 300, CB 400, CB 500 e CB 600, a parte do material que não passou por esse tratamento foi denominada de CAN. Posteriormente a CBCA passou por um peneiramento em peneiras de malha #200 e #400 e a moagem em um moinho de bolas e por fim essas amostras foram submetidas aos ensaios de caracterizações físicas (Área específica, BET (Brunauer-Emmett-Teller) e Massa específica) e caracterização química (D.R.X. e termogravimetria) e ensaios de consistência e resistência a compressão. A existência de atividade pozolânica foi testada através dos ensaios de D.R.X. e resistência a compressão segundo as normas da ABNT NBR 5751 (2012). No ensaios químicos (D.R.X.) ficou constatada a possível existência de atividade pozolânica do material estudado apenas nas cinzas moídas a sete horas, no ensaio de resistência a compressão apenas as cinzas moídas a sete horas apresentaram desempenho satisfatório. O estudo mostrou a importância do processo de moagem do material e de como o mesmo influencia na atividade pozolânica, já o processo de calcinação teve resultados abaixo do esperado principalmente nas temperaturas a partir de 500°C, já que as amostras apresentaram resultados melhores nas temperaturas de 300°C e 400°C.

Palavras-chave: Cinza do bagaço da cana-de-açúcar. Atividade pozolânica. Difração de raio-x.

ABSTRACT

The incorporation of various waste in their production processes has been a trend in the construction industry, this process is aimed at reducing production costs and waste disposal on the environment, within this perspective plant ash has been widely studied because of its potential pozzolanic properties. For this study we used sugar cane bagasse ashes (CBCA) from the state of Pernambuco, this material was subjected to a drying process in oven at 100 ° C and sieving to remove contaminating materials such as leaves, wood and others. The material was divided into four parts and subjected to a calcination process at temperatures of 300 ° C, 400 ° C, 500 ° C and 600 ° C and calls CB300, BC400, BC500 and BC600, the portion of the material which has not undergone this treatment was designated CAN. Subsequently the CBCA passed a sieve of sieve mesh # 200 and # 400 and grinding in a ball mill and finally the samples were subjected to physical characterization assays (specific surface area, BET (Brunauer-Emmett-Teller) and Mass specific) and chemical (DRX and thermogravimetry) and consistency tests and compressive strength. The existence of pozzolanic activity was tested by the D.R.X. tests, thermogravimetry and compressive strength according to ABNT NBR 5751 (2012). In chemical assays (XRD and thermogravimetric analysis) was found to contain the reactivity of the material studied compared to pozzolan reference metakaolin (TCM), as compared to compressive strength testing only the ash grinded to seven hours (M7H) showed satisfactory performance. The study showed the importance of the process of grinding the material and how the same influence on the pozzolanic activity, since the calcination process results below mainly expected at temperatures from 500 ° C, since the samples showed better results in temperatures 300 ° C and 400 ° C.

Keywords : Sugar cane bagasse ashes. Pozzolanic activity. X-ray diffraction.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

FOTO 1 -	Materiais que formam o cimento Portland	18
FOTO 2 -	Tipos de adições do cimento Portland	20
FIGURA 1 -	Fluxograma da pesquisa	29
FIGURA 2 -	Fluxograma do Programa Experimental do tratamento térmico	34
FIGURA 3 -	Fluxograma do Programa Experimental do tratamento de peneiramento / moagem	35
FIGURA 4-	Esquema para a caracterização das amostras	39
FOTO 3 -	Corpos de prova	42
FOTO 4 -	Ensaio de consistência	43
FOTO 5 -	Ensaios de compressão dos corpos de prova	43
GRÁFICO 1 -	Finura Blaine das CBCA	45
GRÁFICO 2 -	Massa específica das CBCA, agrupadas por tratamento de peneiramento / moagem	47
GRÁFICO 3 -	Difração de raios-X da METACAULIM	48
GRÁFICO 4 -	Difração de raios-X daCAN	49
GRÁFICO 5 -	Difração de raios-X da CB 300	50
GRÁFICO 6 -	Difração de raios-X da CB 400	51
GRÁFICO 7 -	Difração de raios-X da CB 500	52
GRÁFICO 8 -	Difração de raios-X da CB 600	53
GRÁFICO 9 -	Termogravimetria Metacaulim	54
GRÁFICO 10 -	Termogravimetria CB 300 M7H	55
GRÁFICO 11 -	Termogravimetria CB 400 M7H	55
GRÁFICO 12 -	Termogravimetria CB 500 M7H	56
GRÁFICO 13 -	Termogravimetria CB 600 M7H	56
GRÁFICO 14 -	Termogravimetria CAN M7H	57
GRÁFICO 15-	Termogravimetria CB 300 R#200	57

GRÁFICO 16 -	Termogravimetria CB 400 R#200	58
GRÁFICO 17 -	Termogravimetria CB 500 R#200	58
GRÁFICO 18 -	Termogravimetria CB 600 R#200	59
GRÁFICO 19 -	Termogravimetria CAN R#200	59
GRÁFICO 20 -	Termogravimetria CB 300 P#200 R#400	60
GRÁFICO 21 -	Termogravimetria CB 400 P#200 R#400	60
GRÁFICO 22 -	Termogravimetria CB 500 P#200 R#400	61
GRÁFICO 23 -	Termogravimetria CB 600 P#200 R#400	61
GRÁFICO 24 -	Termogravimetria CAN P#200 R#400	62
GRÁFICO 25 -	Termogravimetria CB 300 P#400	62
GRÁFICO 26 -	Termogravimetria CB 400 P#400	63
GRÁFICO 27 -	Termogravimetria CB 500 P#400	63
GRÁFICO 28 -	Termogravimetria CB 600 P#400	64
GRÁFICO 29 -	Termogravimetria CAN P#400	64
GRÁFICO 30 -	Variação de massa em função do tratamento térmico e de peneiramento/moagem	65
GRÁFICO 31 -	Resistência à compressão em (Mpa) das CBCA e do MTC em função do tratamento de Calcinação	67
GRÁFICO 32 -	Resistência à compressão em (Mpa) das CBCA e do MTC em função do tratamento de peneiramento / moagem	68
GRÁFICO 33 -	Difração de raios-X da CAN R#200	69
GRÁFICO 34 -	Difração de raios-X da CAN P#200 R#400	70
GRÁFICO 35 -	Difração de raios-X da CAN P#400	70
GRÁFICO 36 -	Difração de raios-X da CAN M7H	71
GRÁFICO 37 -	Difração de raios-X da CB300 R#200	71
GRÁFICO 38 -	Difração de raios-X da CB300 P#200 R#400	72
GRÁFICO 39 -	Difração de raios-X da CB300 P#400	72
GRÁFICO 40 -	Difração de raios-X da CB300 M7H	73
GRÁFICO 41 -	Difração de raios-X da CB400 R#200	73
GRÁFICO 42 -	Difração de raios-X da CB400 P#200 R#400	74

GRÁFICO 43 -	Difração de raios-X da CB400 P#400	74
GRÁFICO 44 -	Difração de raios-X da CB400 M7H	75
GRÁFICO 45 -	Difração de raios-X da CB500 R#200	75
GRÁFICO 46 -	Difração de raios-X da CB500 P#200 R#400	76
GRÁFICO 47 -	Difração de raios-X da CB500 P#400	76
GRÁFICO 48 -	Difração de raios-X da CB500 M7H	77
GRÁFICO 49 -	Difração de raios-X da CB600 R#200	77
GRÁFICO 50 -	Difração de raios-X da CB600 P#200 R#400	78
GRÁFICO 51 -	Difração de raios-X da CB600 P#400	78
GRÁFICO 52 -	Difração de raios-X da CB600 M7H	79
GRÁFICO 53 -	Difração de raios-X da Metacaulim	79
GRÁFICO 54 -	Difração de raios-Xda CH- I	80
GRÁFICO 55 -	Posição 2Ɵ = 17° a 18,54° da CAN	80
GRÁFICO 56 -	Posição 2Ɵ = 17° a 18,54° da CB300	81
GRÁFICO 57 -	Posição 2Ɵ = 17° a 18,54° da CB400	81
GRÁFICO 58 -	Posição 2Ɵ = 17° a 18,54° da CB500	82
GRÁFICO 59 -	Posição 2Ɵ = 17° a 18,54° da CB600	82
GRÁFICO 60 -	Resistencia Compressão (MPa) x Intensidade do Pico das cinzas M7H	83
GRÁFICO 61 -	Análise do Pico na posição 2Ɵ = 18° das cinzas M7H	83

LISTA DE TABELAS

TABELA 1 -	Composições típicas dos compostos de clínqueres industriais	19
TABELA 2 -	Resumo das pesquisas sobre a CBCA	26
TABELA 3 -	Resumo dos resultados das pesquisas sobre a CBCA	27
TABELA 4-	Composição química (% óxidos) e perda ao fogo do metacaulim (MTC)	30
TABELA 5 -	Composição química (% óxidos) e perda ao fogo da CBCA	31
TABELA 6 -	Análise química da cal hidratada CH-I	32
TABELA 7 -	Características físicas da areia quartzosa	32
TABELA 8 -	Propriedades e Características do Aditivo plastificante quartzolite	33
TABELA 9 -	Relação de bolas de alumina, com diâmetros, massas e volumes utilizadas na moagem das CBCA	37
TABELA 10-	Apresentação das amostras obtidas e suas denominações	37
TABELA 11-	Quadro resumo com a área específica da CBCA submetidos a calcinação, moagem e peneiramento	44
TABELA 12-	Quadro resumo com a área superficial da CBCA submetidos a calcinação, moagem e peneiramento	46
TABELA 13 -	Quadro resumo das propriedades das argamassas de cal hidratada com metacaulim e cinza do bagaço de cana-de-açúcar. Moldagem de 3 corpos-de-prova.73	66

LISTA DE EQUAÇÕES

EQUAÇÃO 1 -	Reação Pozolânica	22
EQUAÇÃO 2 -	lei de Bragg	25

LISTA DE ABREVIATURA E SIGLAS

AFm – Monossulfoaluminato de cálcio hidratado

AFt – Sulfoaluminato de cálcio (etringita)

C_2S – Belita - Silicato dicálcico

C_3A – Aluminato - Aluminato tricálcico

C_3S – Alita - Silicato tricálcico

C_4AF – Ferrita - Ferroaluminato tetracálcico

CAH – Aluminato de cálcio hidratado

CAN - Cinza do bagaço da cana-de-açúcar “in natura”

CASH – Silicato aluminato de cálcio hidratado

CB300 - Cinza do bagaço da cana-de-açúcar calcinada à 300ºC

CB400 - Cinza do bagaço da cana-de-açúcar calcinada à 400ºC

CB500 - Cinza do bagaço da cana-de-açúcar calcinada à 500ºC

CB600 - Cinza do bagaço da cana-de-açúcar calcinada à 600ºC

CBCA – Cinza do bagaço da cana-de-açúcar

CCA – Cinza de casca de arroz

CH – Hidróxido de cálcio, Portlandita

CH-I – Cal Hidratado do tipo 1

CP – Cimento Portland

CSH – Silicato de cálcio hidratado

IAC – Índice de atividade com cal

M7H – Material moído por 7 (sete) horas no moinho de bolas

MAC – metacaulim de referência

P400 – material passante na peneira Nº 400 (0,038 mm)

RL – Resfriamento lento

SUMÁRIO

1	**INTRODUÇÃO**	15
1.1	PROBLEMÁTICA E JUSTIFICATIVA	15
1.2	OBJETIVOS	16
1.2.1	**Objetivos geral**	16
1.2.2	**Objetivos específicos**	16
2	**REVISÃO BIBLIOGRÁFICA**	17
2.1	O CIMENTO PORTLAND	18
2.2	MATERIAL POZOLÂNICO	21
2.3	REAÇÕES POZOLÂNICAS NA HIDRATAÇÃO DO CIMENTO	21
2.4	MÉTODOS DE AVALIAÇÃO DA ATIVIDADE POZOLÂNICA	23
2.5	ANÁLISE TÉRMICA DIFERENCIAL E TERMOGRAVIMÉTRICA	24
2.6	DIFRAÇÃO DE RAIO-X	25
2.7	ESTUDOS COM A CINZA DO BAGAÇO DA CANA-DE-AÇÚCAR	25
3	**MATERIAIS E MÉTODOS**	28
3.1	DESCRIÇÃO DA ESTRURURA	28
3.2	MATERIAIS UTILIZADOS	30
3.2.1	**Materiais pozolânicos**	30
3.2.2	**Cal hidratada**	31
3.2.3	**Areia**	32
3.2.4	**Aditivo**	33
3.3	PLANEJAMENTO EXPERIMENTAL	33
3.3.1	**Tipos de tratamento: calcinação e moagem**	33
3.3.1.1	***Calcinação da CBCA***	35

3.3.1.2	***Peneiramento da CBCA***	36
3.3.1.3	***Moagem da CBCA***	36
3.3.2	**Ensaios na cinza**	38
3.3.2.1	***Caracterizações físicas***	39
3.3.2.1.1	*Área específica pelo permeabilímetro de Blaine – NBR NM 76 (1998)*	
3.3.2.1.2	*Massa específica*	39
3.3.2.2	***Caracterizações químicas***	40
3.3.2.2.1	*Difração de raios-X (DRX)*	40
3.3.2.2.2	*Termogravimetria*	40
3.3.3	**Determinação da atividade pozolânica NBR 5751**	41
3.3.4	**Determinação da atividade pozolânica por método físico – NBR 5157**	41
3.3.5	**Ensaio de consistência**	42
	Ensaios de compressão dos corpos de prova	43
4	**RESULTADOS E DISCUSSÃO**	
4.1	CARACTERIZAÇÃO FÍSICA	
4.1.1	**Área específica pelo permeabilímetro de Blaine – NBR NM 76 (1998)**	44
4.1.2	**Massa específica**	46
4.2	CARACTERIZAÇÃO QUÍMICA	48
4.2.1	**Difração de raio-X (DRX)**	48
4.2.2	**Termogravimetria**	54
4.3	ANÁLISE DE ATIVIDADE POZOLÂNICA ABNT NBR 5751 (2012)	66
4.3.1	**Efeitos da calcinação**	67
4.3.2	**Efeitos do peneiramento/moagem**	68

4.4 ANÁLISE DE ATIVIDADE POZOLÂNICA POR DIFRAÇÃO DE RAIO-X 69

5 CONCLUSÕES 85

6 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS 87

REFERÊNCIAS 88

1 INTRODUÇÃO

1.1 Problemática e justificativa

O processo de racionalização dentro da construção civil fez com que fosse cada vez mais importante a diminuição e o reaproveitamento de resíduos diversos. A incorporação de resíduos nos materiais de construção, pode ser vista dentro dessa nova postura do mercado, favorecendo a diminuição dos custos de produção e os impactos ao meio ambiente. Devido a isto, será analisada a possibilidade de utilizar a cinza do bagaço da cana-de-açúcar (CBCA) como substituição do cimento Portland em pastas.

O material foi escolhido pela grande quantidade gerada. Pois atualmente o Brasil é o segundo maior produtor de álcool do mundo, junto com os Estados Unidos eles são os responsáveis por mais de 90% da produção de etanol do mundo, e a matéria prima usada em sua geração no Brasil é a cana-de-açúcar.

A área total plantada em 2013 era de aproximadamente cerca de 8,5 milhões de hectares no país e 270 mil no estado de Pernambuco, sendo sétimo maior produtor de cana-de-açúcar do Brasil com 3,2% da produção total.

Quando a cana-de-açúcar é processada nas usinas ela gera o bagaço como resíduo, que na maioria dos casos é utilizado como combustível, já que ao ser queimado em caldeiras gera o vapor usado para produção de energia elétrica, após essa queima o que sobra é justamente a cinza do bagaço da cana-de-açúcar.

Cada tonelada de bagaço queimado gera aproximadamente 25 kg de cinzas (SALES ; LIMA, 2010). Em 2009 foram gerados 2,5 milhões de toneladas deste produto. Essas cinzas costumam ser lançadas no solo, no entanto, existem estudos para tentar provar a viabilidade da cinza para ser usada em lugar de cimento ou areia na construção civil (CORDEIRO; TOLEDO FILHO; FAIRBAIRN, 2009; LIMA, 2011.).

Além disso, também foi observado em diversos estudos que a CBCA apresenta atividade pozolânica, o que é benéfico para materiais à base Portland, por ser capaz de substituir parte do cimento e melhorar a sua microestrutura.

1.2 Objetivos geral e específicos:

1.2.1 Objetivo Geral

Analisar a atividade pozolânica da cinza do bagaço de cana-de-açúcar e verificar de acordo com as normas se o material pode ser usado como substituição de parte do cimento em pastas de cimento Portland.

1.2.2 Objetivos Específicos

a) Comparar os resultados obtidos com outros materiais pozolânicos de referência como o metacaulim;
b) Verificar a influência da moagem e dos tratamentos aplicados às amostras estudadas em relação a sua atividade pozolânica.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

O reaproveitamento de resíduos dentro dos processos construtivos a fim de diminuir o desperdício, diminuir os custos e melhorar as propriedades dos materiais utilizados, tem se mostrado uma alternativa bastante eficaz.Com base neste princípio, foi escolhida a cinza do bagaço da cana-de-açúcar (CBCA), tanto pela grande quantidade gerada por ano deste material, quanto por suas prováveis propriedades pozolânicas. Na construção civil a CBCA pode ser usada segundo Cordeiro, Toledo Filho e Fairbairn (2009), Macedo (2009) Frías, Villar e Savastano (2011), Lima (2011) e Castro (2012) "para substituir uma parcela do cimento Portland em argamassas e concretos".

A agroindústria é uma das principais atividades econômicas do pais, sendo a produção da cana-de-açúcar uma das suas principais representantes, principalmente para a produção do etanol que conta inclusive com um programa de incentivo do próprio governo que vem da Política Nacional de Biocombustíveis.

A partir da queima do bagaço da cana-de-açúcar são geradas a CBCA e a disposição final deste resíduo tem se mostrado um problema para as usinas.

Existem diversos estudos como os de Castro (2012), que buscam incorporar resíduos de materiais diversos dentro da construção, procurando substituir matérias primas comumente utilizadas tais como cimento e agregados (areia, brita e outros) por esses resíduos industriais.

Um exemplo de material que podemos citar que se enquadra nesta categoria são as cinzas volantes.

Segundo Macedo (2009) "existem estudos sobre a CBCA em vários lugares do mundo, mas há diferenças bastante discrepantes entres 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: cristalina ou amorfa".

Tendo em vista o que foi dito acima para esse estudo foi determinado diferentes temperaturas de calcinação, bem como moagem e peneiramento, afim de se obter uma gama mais ampla de resultados.

2.1 O cimento Portland

O cimento Portland é a principal matéria prima usada em argamassas e concretos e com isso tem um papel de extrema relevância dentro da construção.

Sendo um material amorfo e com propriedades aglomerantes, quando misturado com a água, pode ser unido a materiais inertes tais como areias, britas e pedregulhos. Após um determinado tempo o cimento misturado com a água passa por um período, denominado cura, onde tente a ganhar resistência e se tornar rígido. Sua característica de trabalhabilidade e moldabilidade (quando em estado fresco), somados a sua resistência mecânica, intempéries e agentes agressivos garantem uma grande gama de aplicações.

O cimento Portland comum é formado por clínquer (composto principalmente por calcário, argila) e gesso, sendo que o cimento comercial apresenta o uso de adições ou substituições (FOTO 1).

FOTO 1 - Materiais que formam o cimento Portland

Fonte: ABCP (2006)

A fabricação do clínquer é um processo onde as matérias-primas (usualmente 90% de calcário e 10% argila), depois de britadas e adequadamente misturadas passam por uma queima em forno rotativo a cerca de 1.450ºC, seguida de um rápido arrefecimento.

Os principais óxidos componentes do clínquer são CaO, SiO_2, Al_2O_3 Fe_2O_3. O clínquer é composto basicamente de silicatos cálcicos (alita e belita), que são cristais bem formados, assim como um material intersticial (aluminatos e ferritas), além de materiais diversos em menores quantidades.

A Tabela 1 (TAYLOR, 1997) mostra os valores das composições químicas típicas dos clínqueres industriais.

TABELA 1 - Composições típicas dos compostos de clínqueres industriais

	Na_2O	MgO	Al_2O_3	SiO_2	P_2O_5	SO_3	K_2O	CaO	TiO_2	Mn_2O_3	Fe_2O_3
Alita*	0,1	1,1	1,0	25,2	0,1	0,1	0,1	71,6	0,0	0,0	0,7
Belita*	0,1	0,5	2,1	31,5	0,1	0,2	0,9	63,5	0,2	0,0	0,9
Aluminato (C_3A cúbico)*	1,0	1,4	31,3	3,7	0,0	0,0	0,7	56,6	0,2	0,0	5,1
Aluminato (C_3A ortorrômbico)[0]*	0,6	1,2	28,9	4,3	0,0	0,0	4,0	53,9	0,5	0,0	6,6
Ferroaluminato*	0,1	3,0	21,9	3,6	0,0	0,0	0,2	47,5	1,6	0,7	21,4
Maienita ($C_{12}A_7$)	0,0	0,0	51,5	0,0	0,0	0,0	0,0	48,5	0,0	0,0	0,0
Cal livre (CaO)	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	100,0	0,0	0,0	0,0
Periclásio (MgO)	0,0	100,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Langbeinita [$K_2Ca_2(SO_4)_3$]	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	53,8	21,1	25,1	0,0	0,0	0,0
Arcanita (K_2SO_4)	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	45,9	54,1	0,0	0,0	0,0	0,0
Aphititalita [$K_3Na(SO_4)_2$]	9,3	0,0	0,0	0,0	0,0	48,2	42,5	0,0	0,0	0,0	0,0

Fonte: TAYLOR (1997)

O clínquer possui um processo de hidratação bastante rápido com reações químicas que liberam uma grande quantidade de calor, o que pode ocasionar fissuras no mesmo depois do seu processo de endurecimento.Afim de retardar essas reações e diminuir o calor de hidratação é misturado ao clínquer (cerca de 95%) a Gipsita (cerca de 0,5%), no processo de moagem, para gerar o cimento Portland.

Os materiais utilizados na obtenção do cimento Portland usualmente são de natureza pozolânica, fíler ou escória (FOTO 2).

FOTO 2 – Tipos de adições do cimento Portland

Fonte: ABCP (2006)

O material fíler, geralmente calcário, pó de pedra e pó de quartzo, é extremamente fino e não reage quimicamente, desta forma garantindo um melhor empacotamento granulométrico, dando a mistura, quando presente em pastas, argamassas e concretos uma melhor trabalhabilidade em estado fresco e diminuindo sua porosidade depois de endurecido.

As escórias, subproduto de altos-fornos, e as cinzas volantes, têm propriedades aglomerantes semelhantes as do clínquer, e quando misturadas ao cimento Portland têm o seu processo de hidratação acelerado, desta forma, elas podem substituir até 70% do clínquer

2.2 Material Pozolânico

A pozolana pode ser encontrada na natureza em cinzas de vulcões.Além disso, ela pode ser obtida através da calcinação da argila (metacaulim), de resíduos industriais (cinzas volantes) e pela queima de cascas e bagaços de vegetais como a CBCA.

As pozolanas são materiais constituídos basicamente por sílica (SiO2) e alumina (Al2O3), em estado seco, geralmente não possuem propriedades ligantes, mas em contato com água reage quimicamente com o hidróxido de cálcio [$Ca(OH)_2$] ou soluções alcalinas contendo Ca^{2+} e tendem a adquirir características aglomerantes.

Algumas características dos materiais pozolânicos são:

Óxido de silício, de alumínio, de ferro e de cálcio, e anidrido sulfúrico (≤5%); teor de carbono ≤ 5%; MgO< 4%; Na_2 O < 1,5%; [SiO_2 + Fe_2O_3 + Al_2O_3] ≥ 70%; material contendo SiO_2 (predominante) e microestrutura vítrea. (TAYLOR, 1997)

Algumas vantagens de utilizar a pozolana como adição ou substituição ao cimento são:
1) Elas afetam os produtos de hidratação, tornando mais lenta e consequentemente diminuindo a liberação de calor, 2) benefícios ambientais, como a redução de CO_2 e a diminuição da sua deposição em aterros, 3) e por fim a sua resistência a compressão costuma diminuir a inicialmente mas aumenta a longo prazo (TAYLOR, 1997).

A produção da cana-de-açúcar gera o bagaço como seu resíduo, que costuma ser usada dentro das usinas para alimentar caldeiras para a geração de energia.O produto final dessa queima é a cinza do bagaço da cana-de-açúcar que possui características semelhantes à de outras cinzas vegetais pozolânicas como da casca de arroz, por isso ela também tem a possibilidade de apresentar propriedades pozolânicas.

2.3 Reações pozolânicas na hidratação do cimento.

Segundo Taylor (1997) pode-se dizer que o cimento quando reage com a água suas reações químicas dão a sua capacidade aglomerante e com isso gerar estruturas mais estáveis.Ainda segundo o autor, a composição básica do clínquer é de Alita (C_3S), Belita (C_2S), Aluminatos (C3A) e ferroaluminato tetracálcico (C4AF).

A Alita corresponde a maior parte do clínquer, cerca de 50% a 70% do total, e a Belita tem cerca de 15% a 30%. Eles são os principais responsáveis pelas propriedades mecânicas do cimento após hidratação e cura.

Já os aluminatos que correspondem a cerca de 10% a 25%, e provocam o enrijecimento da pasta de cimento e, consequentemente, sua perda de mobilidade devido a sua rápida velocidade de hidratação.

Conforme dito anteriormente, para regular a velocidade de hidratação e geração de calor é utilizado no cimento a gipsita. Quando a mesma reage com os aluminatos, reações essas que costumam ocorrer geralmente nas primeiras 24h, são originados os cristais de Etringita (C6AS3H32), que nos estágios finais de sua hidratação formam os monosulfatos.

Ainda em estudos realizados por Taylor (1997) foi mostrado que a hidratação dos silicatos ocorre a apenas algumas horas após o início da hidratação do cimento.

A hidratação do C_3S e C_2S origina silicatos de cálcio hidratados que possuem composição química muito variada e são representados genericamente por C-S-H e hidróxido de cálcio (CH). Compostos estes que preenchem o espaço ocupado previamente pela água e pelas partículas de cimento em dissolução, desta forma sendo estes os principais elementos de ligação da pasta de cimento.

Em pesquisas realizadas por Mehta e Monteiro (2008), a resistência final de argamassas e concretos se deve principalmente ao C-S-H, porém aumentar os teores de Belita no cimento não é a única forma de se obter altas quantidades de C-S-H, os aditivos pozolânicos também têm esta finalidade.

A reação química que mostra esse processo, onde as reações pozolânicas consomem os cristais de hidróxido de cálcio e os transformam no gel (C-S-H), pode ser representada pela reação abaixo:

EQUAÇÃO 1 – Reação Pozolânica **(1)**

Pozolâna (S_iO_2) + Portlandita (CH) + água (H) Silicato de cálcio hidratado (C-S-H)

As reações entre o clínquer e o cimento ocorrem lentamente, geralmente entre 7 a 15 dias, liberando uma grande quantidade de calor de hidratação.

Fazendo com que para obras onde sejam utilizadas grandes quantidades de cimento no concreto seja recomendado a utilização de materiais pozolânicos afim de diminuir a sua possibilidade de fissuração.

Além do efeito acima citado, em estudos realizados por Souza e Dal Molin (2005) e Isaia (2011), mostram que os materiais pozolânicos também podem causar o efeito microfíler, onde ele é responsável por aumentar a densidade de misturas provenientes do preenchimento dos vazios pelas minúsculas partículas das adições, cujo diâmetro médio das partículas, devem ser semelhantes ou menores que as do cimento.

Segundo a NBR 12653 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 1992), pode-se definir os materiais com propriedades pozolânicas como materiais silicosos ou sílicoaluminosos que por si só possuem pouca ou nenhuma propriedade cimentícia, mas quando na presença de umidade, reage quimicamente com os produtos hidratados do clínquer para formar compostos com propriedades cimentantes.

Ainda segundo a norma as pozolanas são classificadas como Natural ou Artificial, sendo que para a obtenção das artificiais é necessário utilizar algum tipo de tratamento térmico para que elas possam adquirir propriedades pozolânicas.

Na norma NBR 12653 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 1992), os Materiais pozolânicos são divididos 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.

2.4 Métodos de avaliação da atividade pozolânica

Existem diversas metodologias empregadas na verificação de atividade pozolânica, eles costumam ser divididos em métodos físicos, aqueles que medem a resistência mecânica, e os métodos químicos que são os que analisam as reações químicas.

Os métodos físicos e químicos são normatizados pela. NBR 12653 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 1992), NBR 5751 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2012) que determina o índice de atividade pozolânica com cal hidratada e a NBR 5752 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2014) que determina o índice de atividade pozolânica com cimento Portland.

Nos métodos físicos um índice de consistência é fixado e a relação água/aglomerante é alterada em várias proporções, como essa relação influência diretamente na resistência mecânica essa variação pode indicar a existência de uma atividade pozolânica.

Já em relação aos métodos químicos os mais tradicionais são os métodos de Chapelle modificado (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 15895, 2010) e o método de Fratini (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 5753, 1992), além desses existe também o Método de Lúxan (LUXAN; XADRUGA; SAAVEDRA, 1989). Um problema comum aos métodos químicos é que os estudos através deles costumam se limitar a estudar o concreto por um período em torno de 28 dias, e como a atividade pozolânica costuma ocorrer a longo prazo esses resultados acabam sendo limitados (TAYLOR, 1997).

Ambos os métodos físicos e químicos podem ser considerados coerentes e muitas vezes complementares na determinação da atividade pozolânica.

2.5 Análise Térmica Diferencial e Termogravimétrica

O método da termogravimetria ele se utiliza da técnica na qual a variação de massa (perda ou ganho) de uma substância é medida em função da variação de temperatura (CORDEIRO, 2006).

Enquanto a substância é submetida a uma programação controlada de aumento de temperatura, os diferentes compostos químicos que a compõem sofrem transformações e reações em diferentes temperaturas.

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.

Segundo Freitas (2005), Através da analise térmica é possível verificar em quais temperaturas ocorrem as ocorrem as transformações de fases e nortear a faixa de temperatura nas quais as amostras devem ser calcinadas.

2.6 Difração de raio-x

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 principio se utiliza da lei de Bragg (1913):

EQUAÇÃO 1 – lei de Bragg (1913) **(2)**

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

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 e é medido 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

2.7 Estudos com a cinza do bagaço da cana-de-açúcar

Os quadros das Tabelas 2 e 3 mostram um resumo dos resultados de pesquisas realizadas com a CBCA, investigados no contexto deste trabalho.

TABELA 2 – Resumo das pesquisas sobre a CBCA

AUTOR	PESQUISA
CASTRO, J. N. T. D.	Substituiu de 5 a 20% do cimento por CBCA no concreto e realizou ensaios mecânicos e de durabilidade no concreto
CORDEIRO, G. C.; FILHO, R. D. T.; FAIRBAIRN, E. D. M. R.	Testou a atividade pozolânica da CBCA depois de calcinada a temperaturas de 400 a 900 graus
FARIAS, E. C. D	Fez uma comparação entre a CBCA o Metacaulim para substituição do cimento de 0 a 30% em concretos autoadensáveis
FRÍAS, M.; VILLAR, E.; SAVASTANO,	Testou a atividade pozolânica em cimentos com a substituição pela CBCA em diversas proporções
LIMA, S. A.	Substituiu 0, 30 e 50% do agregado miúdo por CBCA no concreto e realizou ensaios de durabilidade no concreto.
PAULA, M. O. D.	Substituiu de 0 a 30% do cimento por CBCA em argamassas e realizou ensaios químicos e físicos.

Fonte: Autor (2016)

TABELA 3 – Resumo dos resultados das pesquisas sobre a CBCA

AUTOR	**PESQUISA**
CASTRO, J. N. T. D.	O concreto com substituição por CBCA atende as exigências das normas embora exista diminuição da resistência a compressão nos concretos.
CORDEIRO, G. C.; FILHO, R. D. T.; FAIRBAIRN, E. D. M. R.	Apresenta potencial pozolânico especialmente a 600 graus
FARIAS, E. C. D	O concreto com substituição por CBCA atende as exigências das normas.
FRÍAS, M.; VILLAR, E.; SAVASTANO,	Não apresentou atividade pozolânica satisfatória.
LIMA, S. A.	O concreto com substituição da areia por CBCA atende as exigências das normas e apresentou resultados melhores que o da amostra de referência.
PAULA, M. O. D.	O concreto com substituição por CBCA atende as exigências das normas.

Fonte: Autor (2016)

Embora os estudos abordem o mesmo tema, os resultados são conflitantes devido a diversos fatores tais, como a, contaminação do resíduo por materiais diversos como areia, folhas entre outros, gerando desta forma uma distorção dos resultados apresentados, bem como diversas metodologias diferentes no preparo do material.

Com base no princípio destes estudos foi elaborada a metodologia empregada neste projeto.

Os procedimentos envolvem o peneiramento e a moagem para obter a granulometria desejada bem como a queima para garantir as características amorfas do material.

E por fim a determinação da atividade pozolânica do material preparado pela NBR 5751(ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2012) e a DRX.

3 MATERIAIS E MÉTODOS

De uma forma geral, pretende-se aplicar a metodologia citada a exemplo de alguns outros trabalhos, como Wang e Huang (2010), Limbachiya (2009), Farias (2012), Frías, Villar, e Savastano (2011), Lima (2011), Macedo (2009) e Paula (2009) tendo-se como contribuição fornecer, através de um método alternativo, resultados que possam confirmar estudos anteriores e verificar a viabilidade do material estudado ser utilizado na construção como material pozolânico.

3.1 Descrição da estrutura.

Os métodos físicos existentes para determinar a atividade pozolânica são normatizados pelas NBR 12653 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 1992) e a NBR 5751(ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2012) que determinam os índices de atividade pozolânica com cal hidratada (IAC) e a NBR 5752 que determina o índice de atividade pozolânica com cimento Portland (IAP).

Os métodos químicos mais utilizados são o método Chapelle modificado (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 15895..., 2010) e o método de Fratini (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 5753..., 1992), também existe o Método de Lúxan (LUXAN; XADRUGA; SAAVEDRA, 1989) que utiliza conceitos de condutividade elétrica para avaliar a atividade pozolânica.

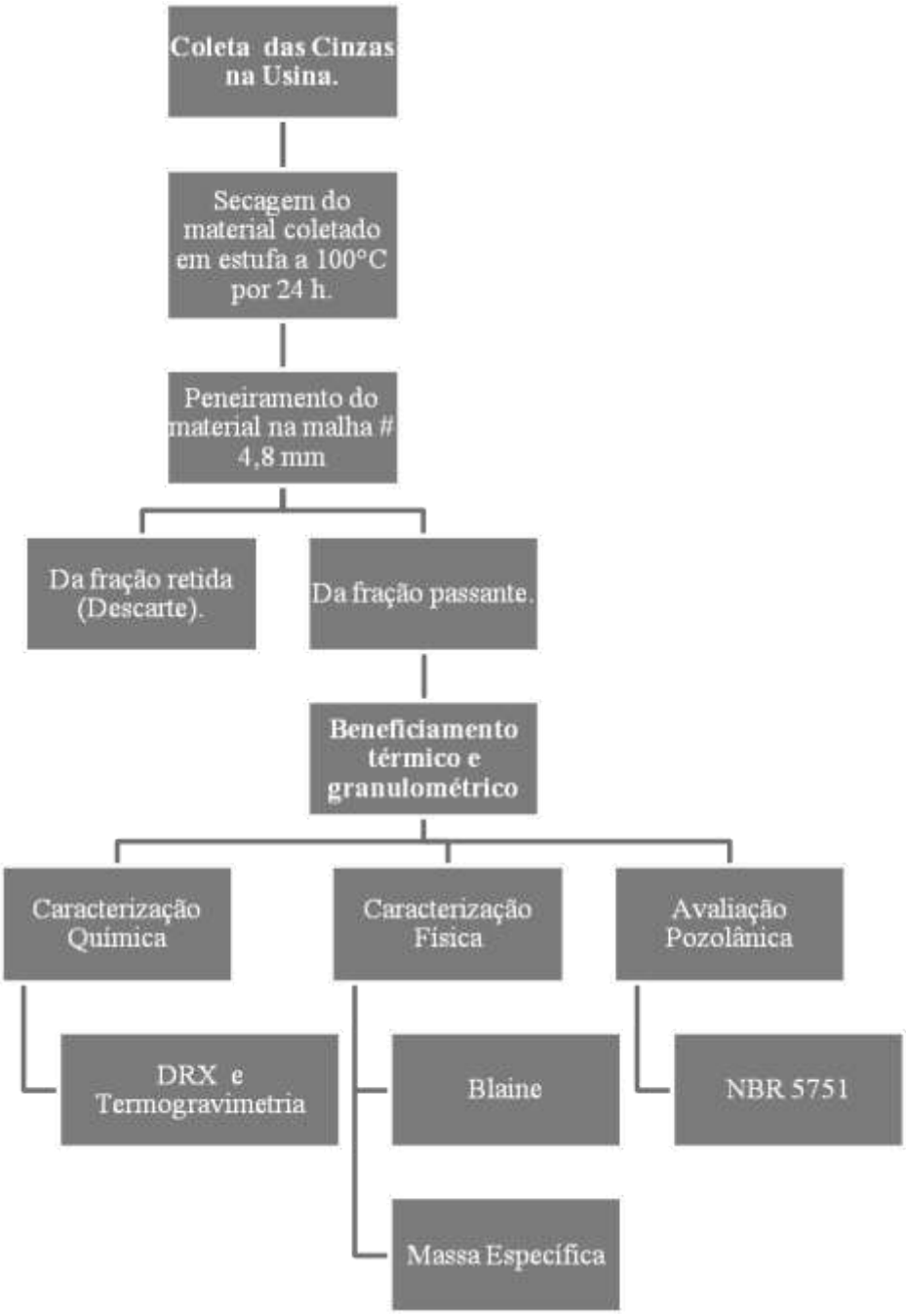
Existem diversos estudos realizados para determinar a atividade pozolânica pelo método do Chapelle modificado, este estudo visa analisar os resultados obtidos pelo Método da difração de raio-x.

As etapas da pesquisa são uma revisão bibliográfica com base em pesquisas anteriormente realizadas sobre o tema, seguido da determinação da atividade pozolânica nas amostras estudadas através de um estudo experimental.

As amostras do material foram preparadas no laboratório de engenharia civil da UFPE - campus Mata Norte e os ensaios foram realizados no CETENE de Recife.

O fluxograma da Figura 1 mostra as etapas do trabalho.

FIGURA 1 - Fluxograma da pesquisa.



Fonte: O autor (2016).

3.2 Materiais utilizados

3.2.1 Materiais pozolânicos

Nesta pesquisa a cinza do bagaço da cana-de-açúcar (CBCA), resíduo base da pesquisa, foi comparada ao metacaulim, que é um material pozolânico de larga aplicação no estado de Pernambuco e de fácil obtenção.

O metacaulim utilizado foi o da empresa Caulim do Nordeste S.A, o mesmo possui uma cor alaranjada e uma granulometria fina, por se tratar de um material comercial não foi feito nenhum tipo de preparo.

Na Tabela 4 consta a composição 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 4 - Composição química (% óxidos) e perda ao fogo do metacaulim (MTC).

Óxidos:	Resultado (%)	Óxidos:	Resultado (%)
CaO	1	**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; V_2O_5	-	**Perda ao Fogo**	1,7
TOTAL		**99,50%**	

Fonte: O autor (2016).

A CBCA foi coletada em uma usina de cana-de-açúcar localizada no estado de Pernambuco. O bagaço da usina foi queimado em uma caldeireira a cerca de 300ºC de temperatura e seu resíduo é a utilizada neste estudo.

A CBCA coletada apresentava uma cor escura e granulometria grosseira, o que indica que a cinza possui um elevado teor de carbono, para que fosse possível a sua utilização nesta pesquisa as amostras foram submetidas aos tratamentos de secagem, calcinação e moagem descritos no item 3.4 para a sua posterior análise nos ensaios.

Na Tabela 5 é mostrada a análise por FR-X de uma amostra de CBCA in natura passante na peneira # 4,8 mm.

TABELA 5 - Composição química (% óxidos) e perda ao fogo da CBCA.

Óxidos:	Resultado (%)	Óxidos:	Resultado (%)
CaO	0,7	**SiO_2**	**89,2**
Al_2O_3	**2,2**	**Fe_2O_3**	**1,7**
SO_3	0,3	**MgO**	0,3
TiO_2	0,3	**K_2O**	2,3
P_2O_5	0,7	**Cr_2O_3**	-
NiO; MnO	-	**Perda ao Fogo**	2,14
TOTAL		**99,84%**	

Fonte: O autor (2016).

3.2.2 Cal Hidratada

Na moldagem dos corpos de prova utilizados nos ensaios de resistência mecânica, foi utilizada a cal hidratada CH-I da marca Tradical. A Tabela 6 apresenta a análise química, fornecidas pelo fabricante da cal hidratada.

TABELA 6 - Análise química da cal hidratada CH-I.

Caracterização Química:	Resultado (%)
CaO	71,7
MgO	0,75
Resíduo Insolúvel	1,13
Umidade	0,62
Perda ao Fogo	25,5
CO_2	1,59
SO_3	0,25
$Fe_2O_3 + Al_2O_3$	0,74

Fonte: Tradical (2015).

3.2.3 Areia

Na moldagem dos corpos de prova utilizados nos ensaios de resistência mecânica, foi utilizada a areia proveniente de jazida do município de Caruaru-PE, quartzosa, lavada. A amostra passou por um processo de peneiramento peneira de abertura de 4,8 mm e uma posterior secagem na estufa a 105ºC por 24 horas e, por fim, guardado em tonéis enquanto esperava sua utilização.

Na Tabela 7 são apresentadas as características físicas e a distribuição granulométrica do agregado miúdo (areia quartzosa).

TABELA 7 - Características físicas da areia quartzosa.

Características físicas	Resultado
Massa específica ABNT NBR 9776 (1987):	2,65 kg/dm³
Módulo de finura ABNT NBR 7217 (1987):	1,83

Fonte: O autor (2016).

3.2.4 Aditivo

O aditivo utilizado moldagem dos corpos de prova foi 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 8.

TABELA 8 - Propriedades e Características do Aditivo plastificante quartzolite.

Propriedades e características	Resultado
Base de formulação	Surfactantes
Massa específica	1,002 a 1,004 kg/dm³
pH	4,5 a 7,5
Teor de sólidos	3,0 a 4,0%

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

3.3 Planejamento experimental

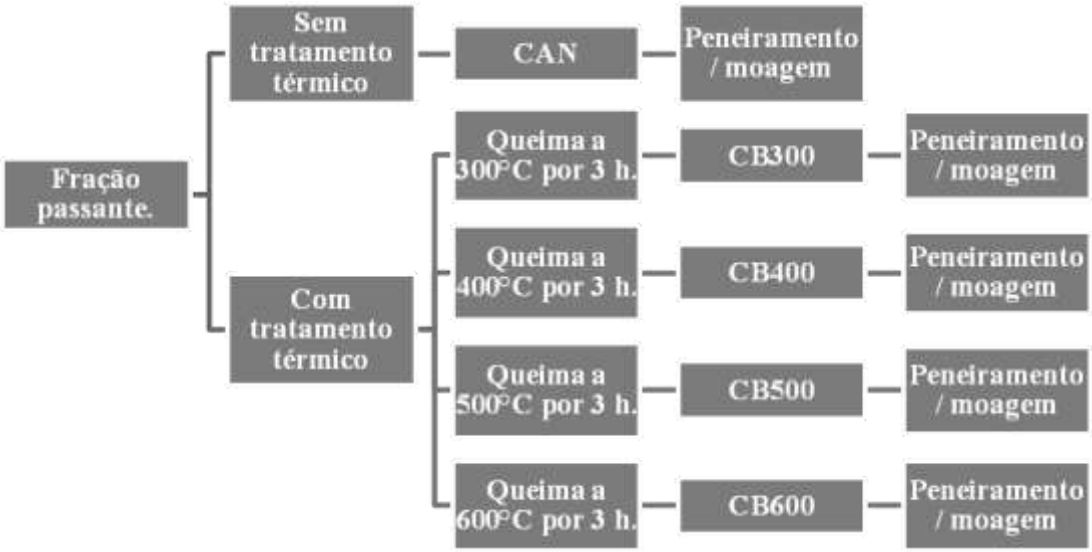
3.3.1 Tipos de tratamento: calcinação e moagem

Como o material pozolânico de referência (MTC), foi o metacaulim, e foi usada sua versão industrializada, não foi realizado nele nenhum tipo de tratamento, já em relação à CBCA ela passou pelo seguinte processo de preparação:

1) A amostra foi seca em uma estufa a 100 ºC pelo período de 24 horas;
2) Em seguida, foi peneirada na peneira de abertura de 4,8 mm afim de evitar a contaminação de outros materiais, como pedras, folhas entre outros;
3) Ao material que ficou retido na peneira foi descartado;
4) O material passante da peneira de abertura de 4,8 mm foi dividido em 5 frações e submetido aos tratamentos descritos nos próximos itens, essa amostra foi chamada de CAN;

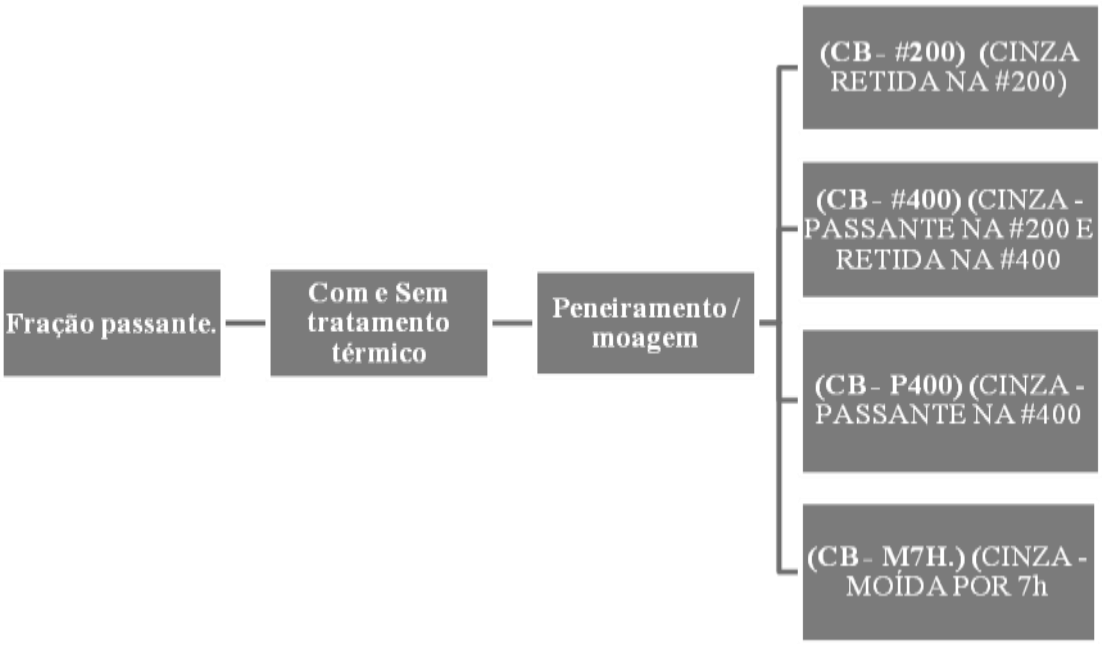
O material passante foi submetido ao tratamento mostrado no fluxograma abaixo (FIGURAS 2 e 3).

FIGURA 2 - Fluxograma do Programa Experimental do tratamento térmico.



Fonte: O autor (2016).

FIGURA 3 - Fluxograma do Programa Experimental do tratamento de peneiramento / moagem



Fonte: O autor (2016).

3.3.1.1 Calcinação da CBCA

5) Para analisar cada uma das amostras foi realizada a queima em 4 temperaturas, 300, 400, 500ºC e 600 ºC. Essas temperaturas foram escolhidas tendo como base um trabalho anterior realizado por Vasconcelos (2013), onde as amostras de CBCA foram calcinadas a temperaturas de 600 ºC, 700 ºC e 800ºC, como os resultados mais próximos do desejado foram obtidos pela temperatura de 600 ºC, devido a isto foi escolhido as temperaturas acima citadas;
6) O forno utilizado foi do tipo mufla com dimensões internas de 170 x 190 x 250 mm, com aquecimento até 1200 °C, presente no laboratório de engenharia civil da UFPE.

Conforme mostrado no fluxograma 8.0 a nomenclatura das amostras ficou: CB300 (temperatura máxima de queima foi de 300°C), CB400 (queima a 400°C), CB500 (queima a 500°C) e CB600 (queima de 600°C).

3.3.1.2 Peneiramento da CBCA

Para o processo de moagem e peneiramento foi utilizado um conjunto adaptado de peneiras granulométricas quadradas com dimensões 50 x 50 x 10 cm, da marca Pavitest, que permite a troca de tela.

O procedimento adotado seguiu os seguintes passos:

1) Para cada peneiramento foi realizado seis (6) ciclos de peneiramento de 15 minutos, com intervalos de 5 minutos, tendo um total de 2 horas de peneiramento, este intervalo de tempo foi dado pois o equipamento não suportava trabalhar por 1 hora e 30 minutos sem intervalos;
2) Foi colocada a amostra na peneira #200;
3) O material passante na peneira #200 foi para a peneira #400;
4) Por fim a parte passante na peneira #400 ficou depositado na bandeja no fundo da peneira;

3.3.1.3 Moagem da CBCA

Para a moagem do material foi utilizado um moinho rotativo de bolas. Nele foram colocadas 71 bolas correspondentes a uma massa de 3000 g, como apresentado na Tabela 9.0. A rotação foi de 200 rpm e a duração de 7 horas. Em cada moagem foram utilizados 1,300 kg de CBCA tanto a CAN quanto as CB300, CB400, CB500 e CB600 (TABELA 9 e 10).

TABELA 9 – Relação de bolas de alumina, com diâmetros, massas e volumes utilizadas na moagem das 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**	**2000**

Fonte: O autor (2016).

TABELA 10 - Apresentação das amostras obtidas e suas denominações.

AMOSTRAS	DESCRIÇÃO
MTC	Metacaulim - material pozolânico de referência, adquirido no mercado.
CAN#200	CBCA “in natura”, sem moer e retida na peneira Nº 200 (0,075 mm).
CAN#400	CBCA “in natura”, sem moer e retida na peneira Nº 400.
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.
CB300#200	CBCA calcinada a 300ºC, RL, sem moer e retida na peneira Nº 200.
CB300#400	CBCA calcinada a 300ºC, RL, sem moer e retida na peneira Nº 400.
CB300P400	CBCA calcinada a 300ºC, RL, sem moer e passante na peneira Nº 400.
CB300M7H	CBCA calcinada a 300ºC, RL, moída por 7 horas no moinho de bolas.
CB400#200	CBCA calcinada a 400ºC, RL, sem moer e retida na peneira Nº 200.
CB400#400	CBCA calcinada a 400ºC, RL, sem moer e retida na peneira Nº 400.
CB400P400	CBCA calcinada a 400ºC, RL, sem moer e passante na peneira Nº 400.
CB400M7H	CBCA calcinada a 400ºC, RL, moída por 7 horas no moinho de bolas.

CB500#200	CBCA calcinada a 500ºC, RL, sem moer retida na peneira Nº 200.
CB500#400	CBCA calcinada a 500ºC, RL, sem moer e retida na peneira Nº 400.
CB500P400	CBCA calcinada a 500ºC, RL, sem moer e passante na peneira Nº 400.
CB500M7H	CBCA calcinada a 500ºC, RL, moída por 7 horas no moinho de bolas.
CB600#200	CBCA calcinada a 600ºC, RL, sem moer retida na peneira Nº 200.
CB600#400	CBCA calcinada a 600ºC, RL, sem moer e retida na peneira Nº 400.
CB600P400	CBCA calcinada a 600ºC, RL, sem moer e passante na peneira Nº 400.
CB600M7H	CBCA calcinada a 600ºC, RL, moída por 7 horas no moinho de bolas.

Fonte: O autor (2016).

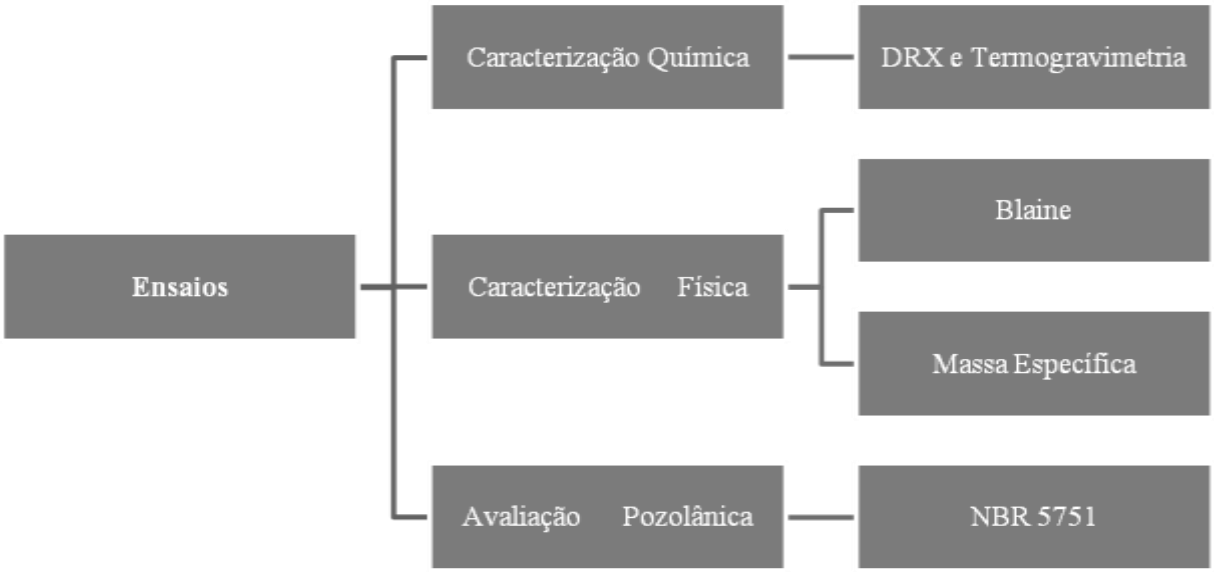
3.3.2 Ensaios na cinza.

Os ensaios da CBCA foram realizados no Centro de Tecnologias Estratégicas do Nordeste (CETENE) e no Laboratório de Construção Civil da UFPE Campus Agreste.

Os dados das amostras são:

O fluxograma da Figura 4 mostra os ensaios realizados nas amostras

FIGURA 4 - Esquema para a caracterização das amostras.



Fonte: O autor (2016).

3.3.2.1 Caracterizações físicas

3.3.2.1.1 Área específica pelo permeabilímetro de Blaine - NBR NM 76 (1998)

Foram realizados os ensaios de área específica pelo método Blaine no Laboratório de Construção Civil da UFPE Campus Agreste. O procedimento utilizado consiste no tempo necessário que determinada quantidade de gás para atravessar uma camada de cimento compactada, de dimensões e porosidade especificadas, o equipamento utilizado foi o permeabilímetro de blaine

3.3.2.1.2 Massa específica

Para determinar a massa específica da CBCA foi utilizado o multipicnômetro a gás hélio, Quantachrome Instruments, modelo 1000.

A massa é determinada pela variação da pressão do gás em um volume calibrado, o hélio é injetado no aparelho de forma que preencha os vazios existentes na amostra.

3.3.2.2 Caracterizações químicas

Os ensaios de caracterização química que foram realizados:

3.3.2.2.1 1Difração de raios-X (DRX);

Os ensaios foram realizados no CETENE e o equipamento utilizado foi o Difratômetro de Raios-X Bruker D8 AdvanceDavinci.

Os Parâmetros de entrada utilizados nos ensaios foram:

Tipo de análise: θ-2θ

Varredura (em º) 5º até 75º (2θ)

Tempo (em segundos) 1 s

Incremento (em º) 0,02º

3.3.2.2.2 Termogravimetria

Ele se utiliza da técnica na qual a variação de massa (perda ou ganho) de uma substância é medida em função da temperatura, enquanto a substancia é submetida a uma programação controlada de alteração da temperatura.

Para a realização da Análise Térmica Diferencial e Termogravimetria, as amostras foram aquecidas a uma taxa de aquecimento de 10ºC por minuto até atingirem os 1000ºC, sob atmosfera de nitrogênio, cada amostra tinha em torno de 20 a 40 miligramas.

3.4.3 Determinação da atividade pozolânica NBR 5751

Os Procedimentos de Moldagem dos corpos-de-prova empregados foram:

Deixando apenas a água e a cal hidratada para pesar apenas no momento da moldagem.

a) A cinza e a cal hidratada foram misturadas e bem homogeneizadas em recipiente fechado.
b) A água de amassamento foi coloca na mistura.
c) Os corpos-de-prova foram moldados em sacos plásticos.
d) E vedados com filme plástico.
e) Os corpos-de-prova foram armazenados por 24 horas em uma temperatura de (23 ± 2) °C.
f) Durante as (144 ± 2) h posteriores, os corpos-de-prova foram mantidos a uma temperatura de (55 ± 2) °C até (4 ± 0,5) h antes de congelar os sacos plásticos.

3.4.4 Determinação da atividade pozolânica por método físico – NBR 5751

Afim de complementar os resultados obtidos pelo método químico, foi realizado ensaios utilizado um método físico normatizado pela Associação Brasileira de Normas Técnicas (NBR 5751, 2012), onde os corpos-de-prova são submetidos ao ensaio de resistência a compressão.

Os Procedimentos de Moldagem dos corpos-de-prova foram realizados segundo a norma da NBR 5738, sendo que antes de moldar os corpos-de-prova foi realizado um ensaio de consistência das amostras e por fim foram armazenadas durante as 144 h posteriores, a uma temperatura de (55 ± 2) °C até 4 h antes do ensaio de ruptura à compressão, quando os corpos de prova estavam a uma temperatura de (23 ± 2) ° (FOTO 3)

FOTO 3 – Corpos de Prova.

Fonte: O autor (2016).

3.4.4 Ensaio de consistência

Os procedimentos para a realização dos ensaios de consistência foram realizados segundo a norma NBR NM 43/2003 (FOTO 4):

a) A mistura, foi lubrificada ligeiramente a mesa do aparelho de consistência com óleo mineral;
b) A argamassa foi colocada no molde tronco-cônico e moldada em 3 camadas (15, 10 e 5 golpes);
c) Foi realizado os 30 golpes em 30 segundos e medir o espalhamento com o paquímetro.

FOTO 4 – Ensaio de Consistência.

Fonte: O autor (2016).

3.4.5 Ensaios de compressão dos corpos-de-prova

Os ensaios de compressão dos corpos-de-prova foram realizados no laboratório de materiais da UFPE – campus agreste.

Os corpos-de-prova foram armazenados por 144 horas em uma câmara úmida até a data da realização dos ensaios

Após os procedimentos de nivelamento das superfícies foi submetido ao rompimento por compressão (FOTO 5).

FOTO 5 – Ensaios de compressão dos corpos-de-prova.

Fonte: O autor (2016).

4.0 RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 Caracterização Física

A atividade pozolânica de um material está ligada a propriedades físicas tais como área superficial e módulo de finura.

Será mostrado a seguir o resultado destes ensaios.

4.1.1 Área específica pelo permeabilímetro de Blaine - NBR NM 76 (1998)

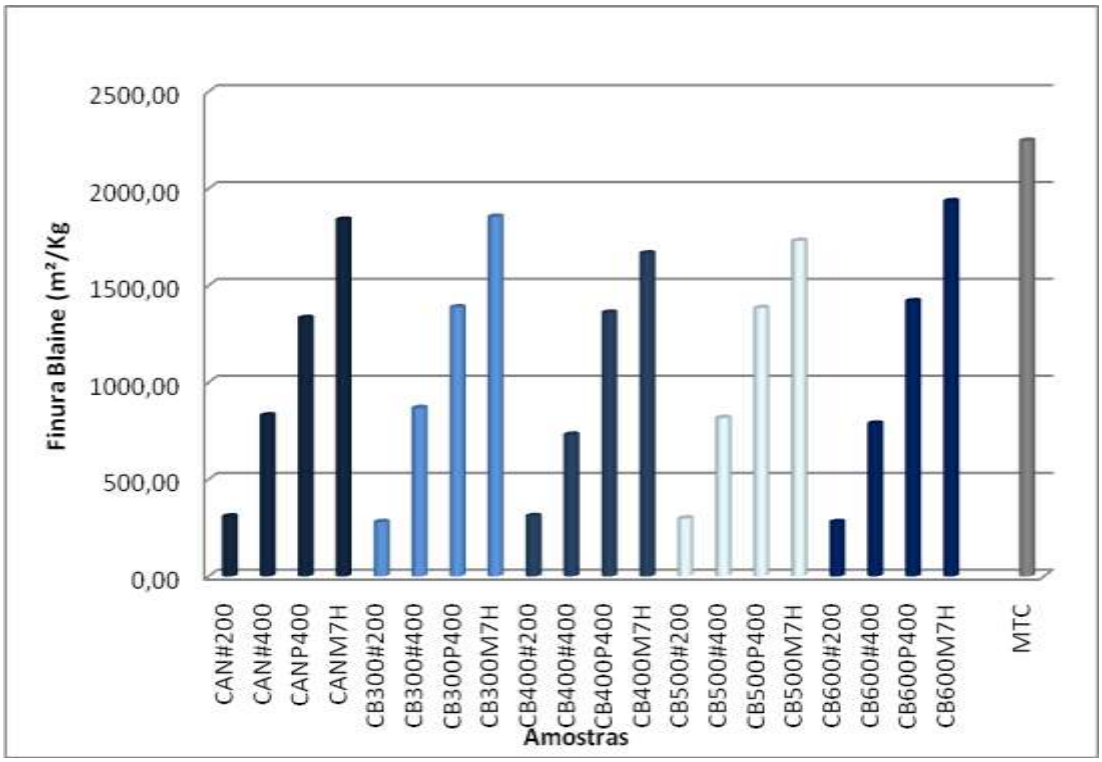
A Tabela 11 e o Gráfico 1 mostram os resultados obtidos durante a realização dos ensaios de área específica.

TABELA 11- Quadro resumo com a área específica da CBCA submetidos a calcinação, moagem e peneiramento.

Amostras	Finura Blaine (m^2/kg)	Amostras	Finura Blaine (m2/kg)
CAN#200	307,93	**CB400M7H**	1664,47
CAN#400	389,51	**CB500#200**	297,94
CANP400	1331,54	**CB500#400**	816,22
CANM7H	1838,44	**CB500P400**	1383,05
CB300#200	279,24	**CB500M7H**	1729,92
CB300#400	867,03	**CB600#200**	279,13
CB300P400	1386,73	**CB600#400**	786,77
CB300M7H	1853,80	**CB600P400**	1418,30
CB400#200	309,95	**CB600M7H**	1933,89
CB400#400	729,45	**MTC**	2245,49
CB400P400	1358,83		

Fonte: O autor (2016).

GRÁFICO 1 – Finura Blaine das CBCA



Fonte: O autor (2016).

Com os resultados obtidos na Tabela 11 e na figura 18 podemos observar a existência de 4 módulos de finura: o retido na peneira 200 (300±50 m2/kg), o retido na peneira 400 (800±70 m2/kg), o passante na peneira 400 (1375±50 m2/kg) e por fim o moído 7h (1800±150 m2/kg), a exceção fica por conta da CAN #400 que apresenta um resultado destoante com dos demais.

Pode-se observar pelos dados apresentados acima que o peneiramento e a moagem realizados nas amostras foram bem-sucedidos, pois, os procedimentos utilizados tinham como objetivo obter resultados superiores a 1700 m2/kg para as cinzas moídas 7h.

4.1.2 Massa específica

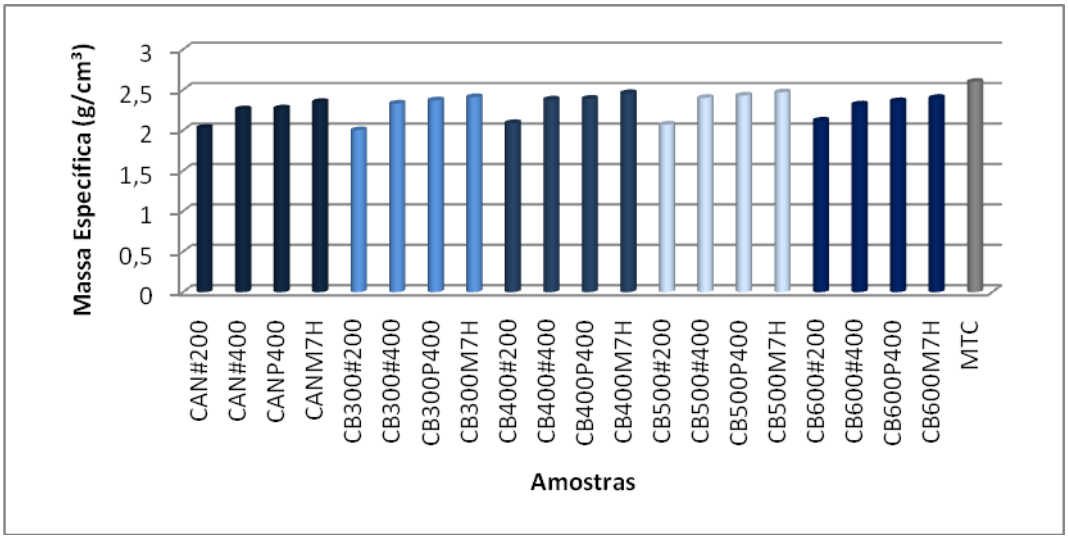
A Tabela 12 e o Gráfico 2 mostram os resultados obtidos durante a realização dos ensaios de massa específica.

TABELA 12 – Quadro resumo com a massa específica da CBCA submetidos a calcinação, moagem e peneiramento.

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

Fonte: O autor (2016).

GRÁFICO 2 - Massa específica das CBCA, agrupadas por tratamento de peneiramento / moagem.



Fonte: O autor (2016).

Observando os resultados obtidos na Tabela 13 e na Gráfico 20 nota-se que para as amostras retidas na peneira 200 temos a média de 2,06 g/ cm^3, para as amostras retidas na peneira 400 temos a média de 2,34 g/ cm^3, enquanto na passante da peneira 400 a média ficou 2,36 g/cm^3, e for fim, nas amostras moídas 7 horas obtivemos a média de 2,42 g/ cm^3, sendo mostrado desta forma que os tratamentos de moagem e peneiramento influenciaram nos resultados obtidos.

Em todos os casos os resultados obtidos foram inferiores aqueles do metacaulim2,60 g/cm, mas estão coerentes com aqueles obtidos em outras pesquisas com a CBCA como a realizada por Cordeiro (2006) que teve a media de 2,27 g/ cm^3.

4.2 Caracterização química

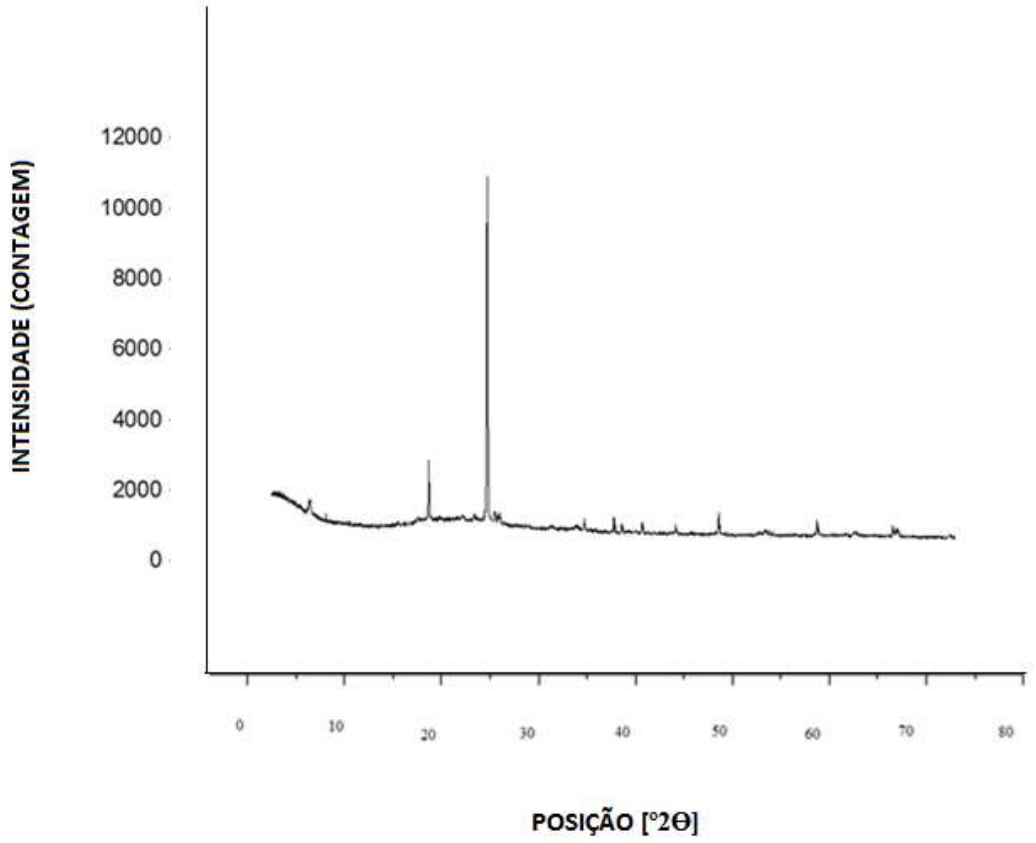
4.2.1 Difração de raio-X (D.R.X)

Os Gráficos 3, 4, 5, 6, 7 e 8 mostram os resultados obtidos nos ensaios de difração de raios-X, primeiro são apresentados os resultados da CAN, e posteriormente as cinzas calcinadas a 300°, 400°, 500°, 600°C e o metacaulim.

Pela análise do D.R.X. foi possível identificar as fases cristalinas e amorfas da CBCA

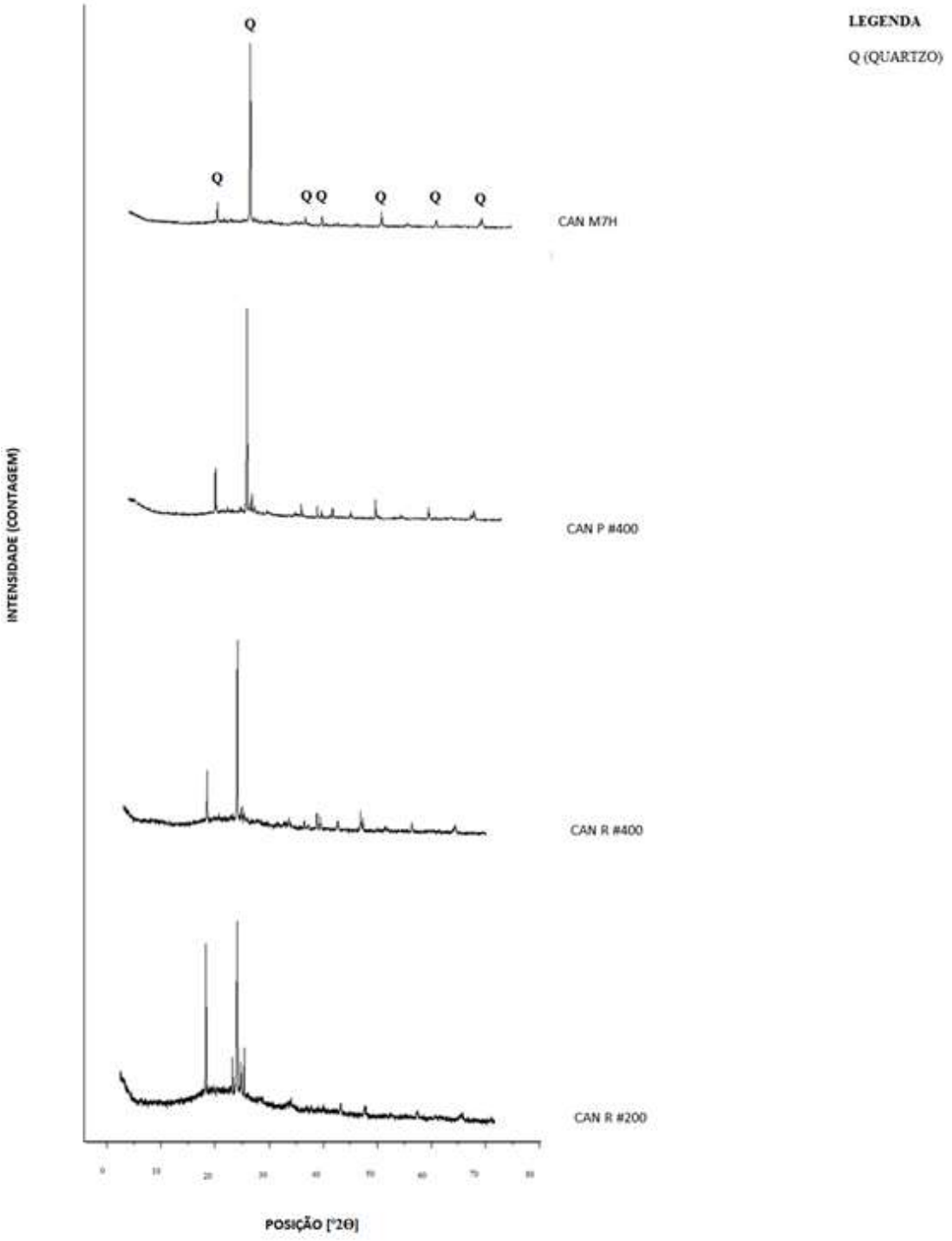
O pico das cinzas ocorre com grande intensidade na posição 2Θ = 26º, onde pode-se observar presença de quartzo e que elas possuem a mesma fase cristalina.

GRÁFICO 3 – Difração de raios-X da METACAULIM



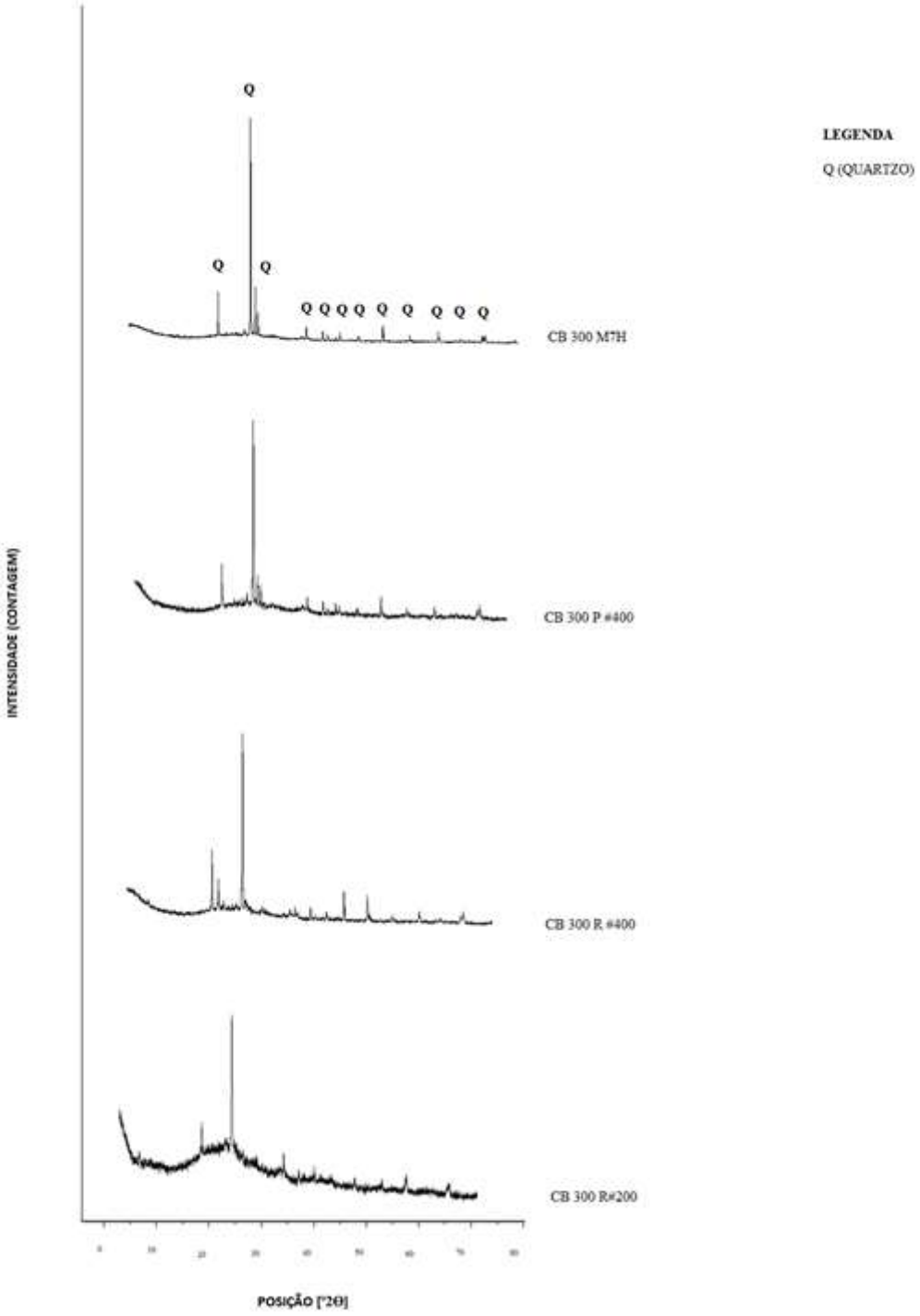
Fonte: O autor (2016).

GRÁFICO 4 – Difração de raios-X da CAN



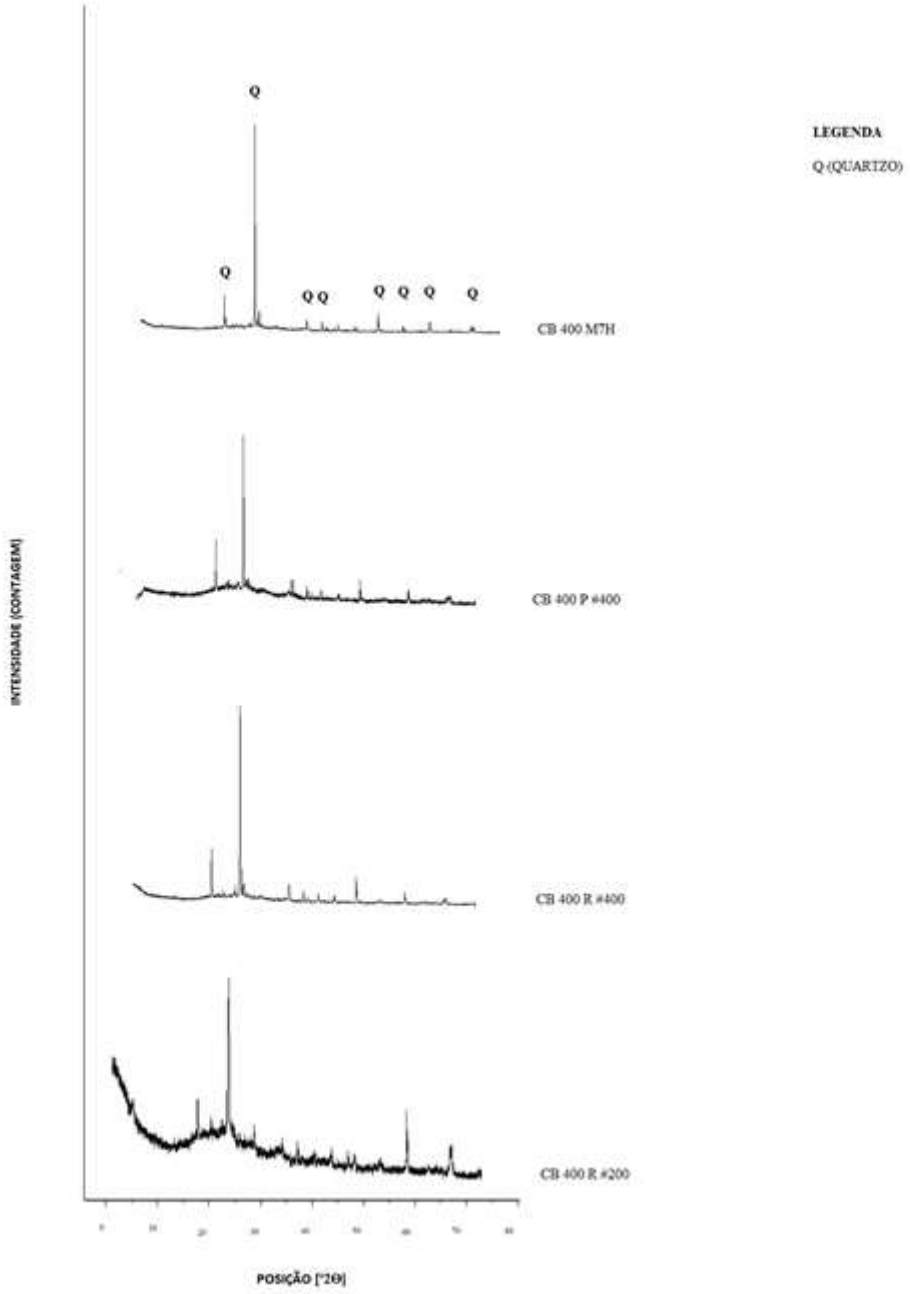
Fonte: O autor (2016).

GRÁFICO 5 – Difração de raios-X da CB 300



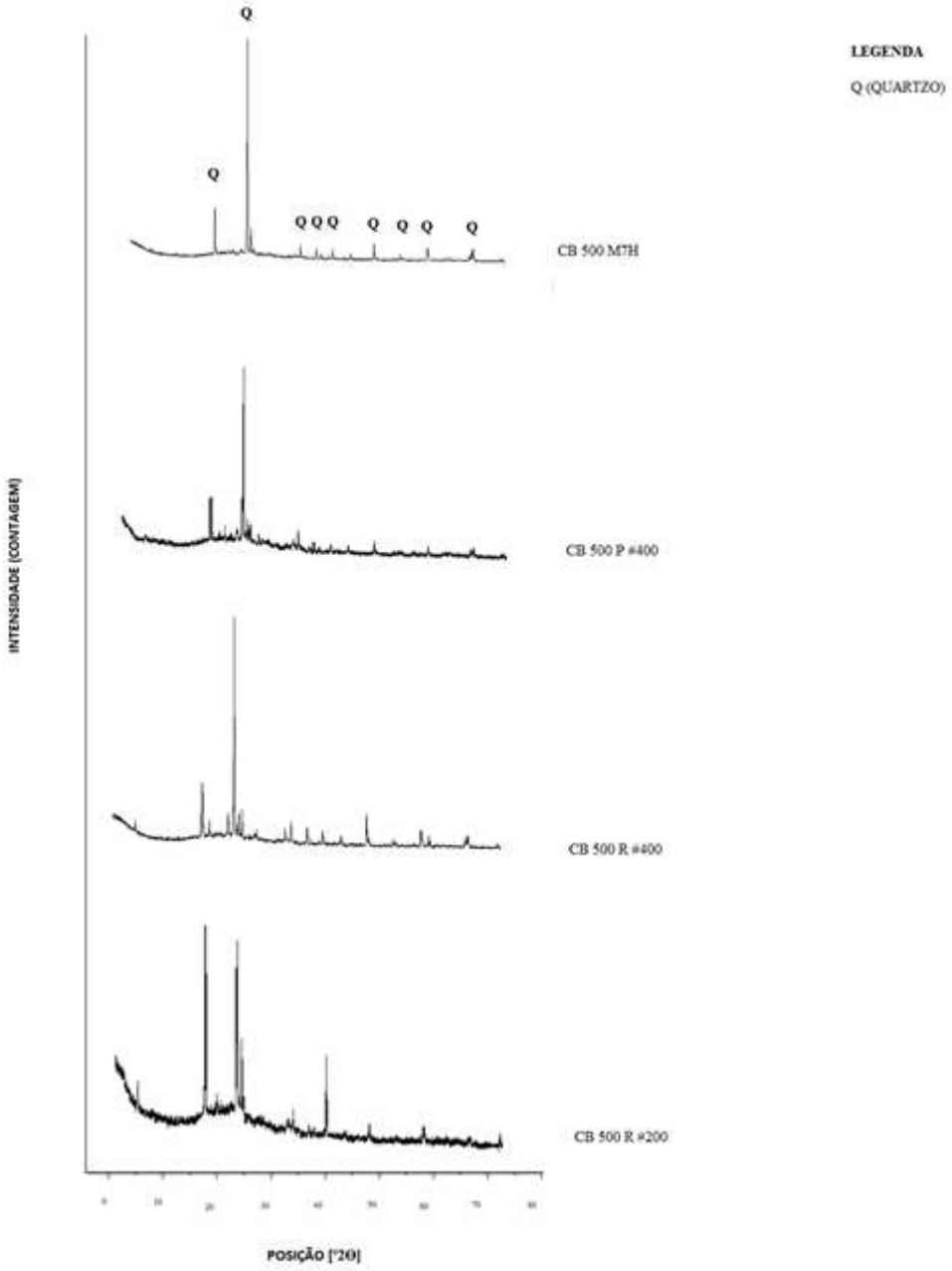
Fonte: O autor (2016).

GRÁFICO 6 – Difração de raios-X da CB 400



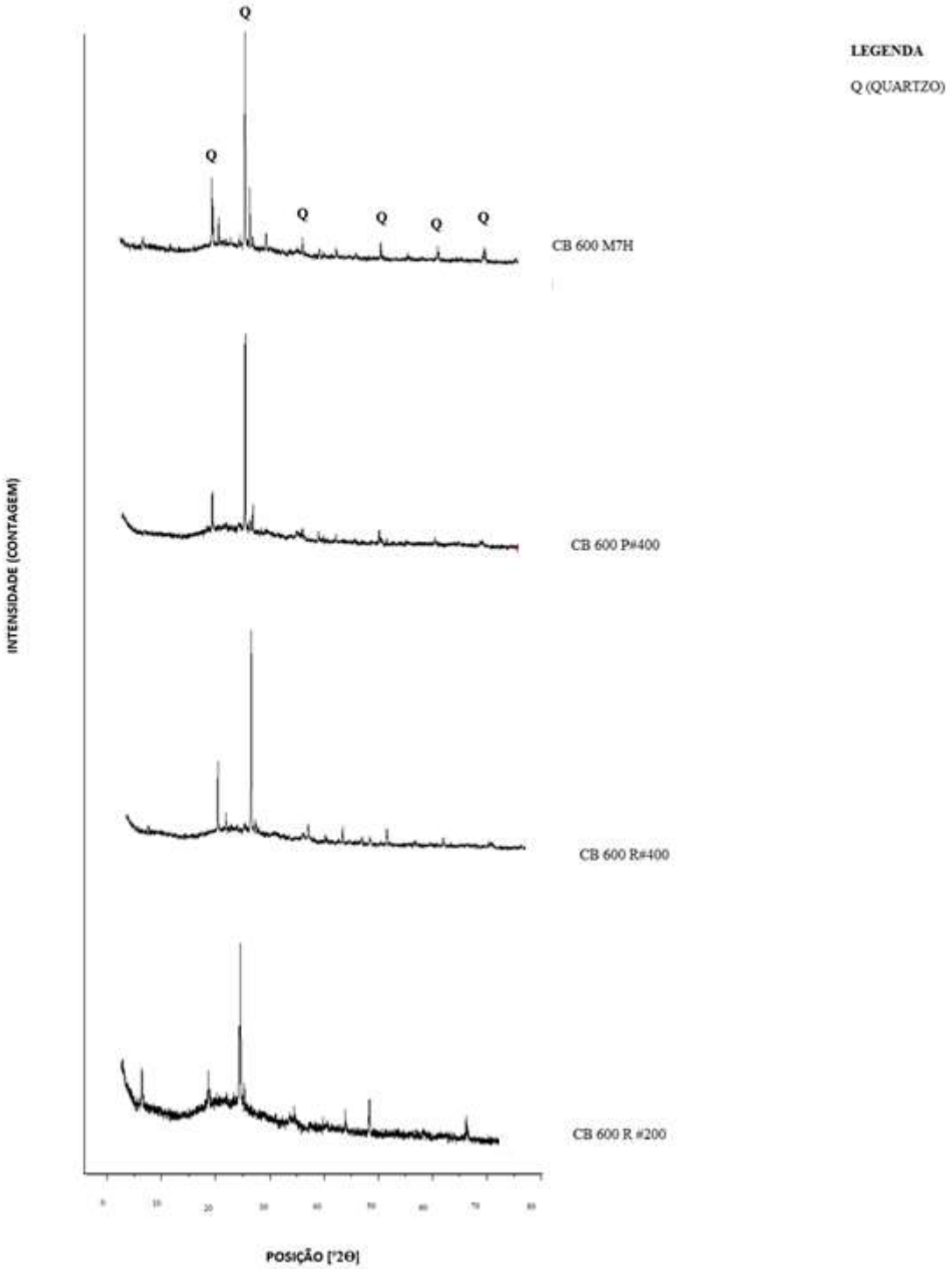
Fonte: O autor (2016).

GRÁFICO 7– Difração de raios-X da CB 500



Fonte: O autor (2016).

GRÁFICO 8– Difração de raios-X da CB 600



Fonte: O autor (2016).

Nas cinzas estudadas é possível observar uma grande quantidade de quartzo, o que não é desejável pois ele é inerte e não apresenta nenhuma atividade pozolânica.

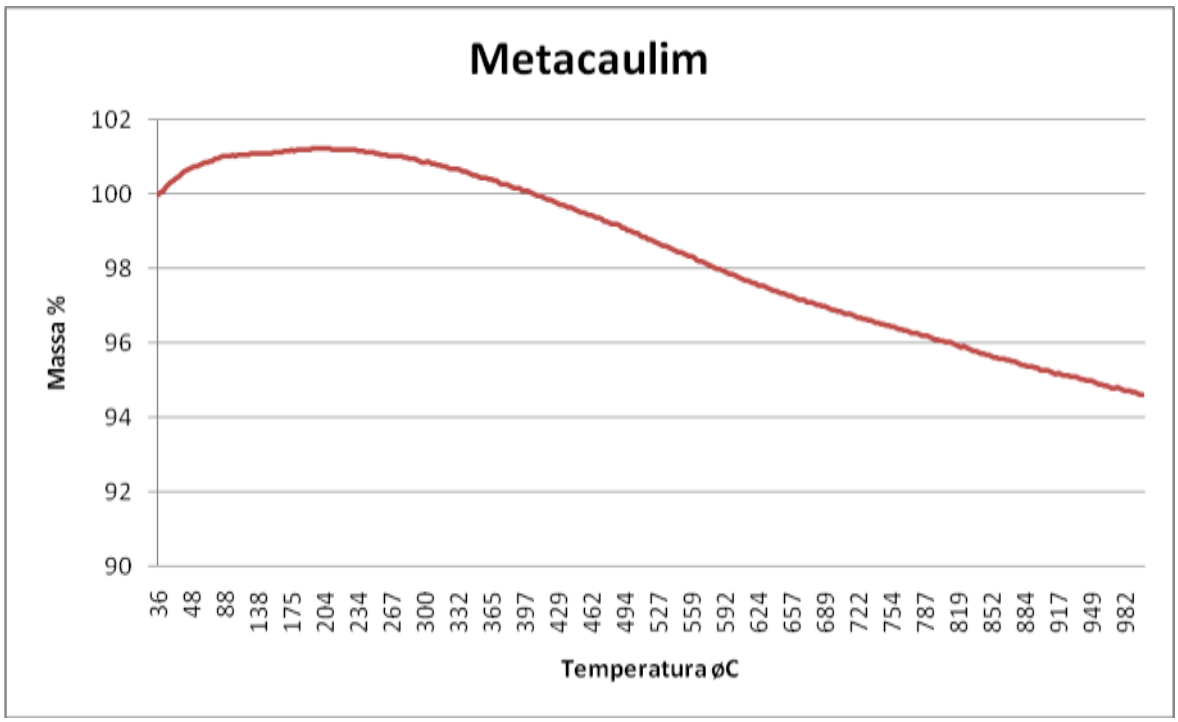
Pode-se atribuir a presença do quartzo no resultado dos ensaios a diversos fatores tais como a contaminação do material durante o corte e a moagem da cana-de-açúcar na usina.

4.2.2 Termogravimetria

A Termogravimetria é uma técnica que permite avaliar a quantidade de hidróxido de cálcio das reações de hidratação do cimento.

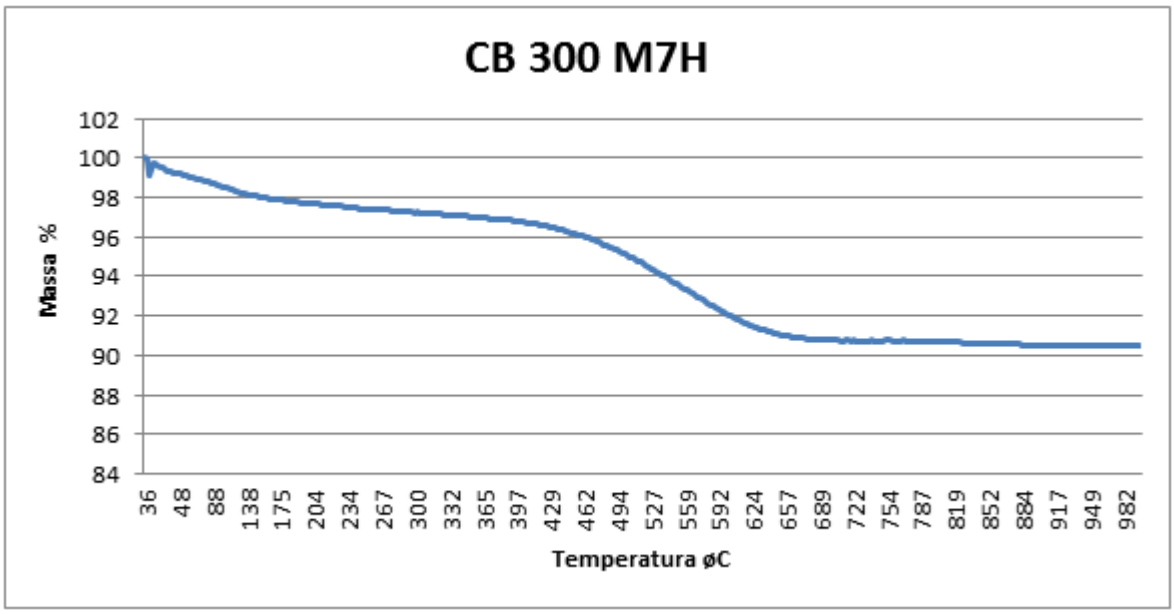
De acordo com Taylor (1990) a decomposição do hidróxido de cálcio ocorre entre 425°C a 550°C. Desta forma quando ocorre a diminuição do pico neste intervalo de temperatura, é possível a constatação da atividade pozolânica, representando assim, o consumo de hidróxido de cálcio (GRÁFICOS 9 até 29).

GRÁFICO 9– Termogravimetria Metacaulim



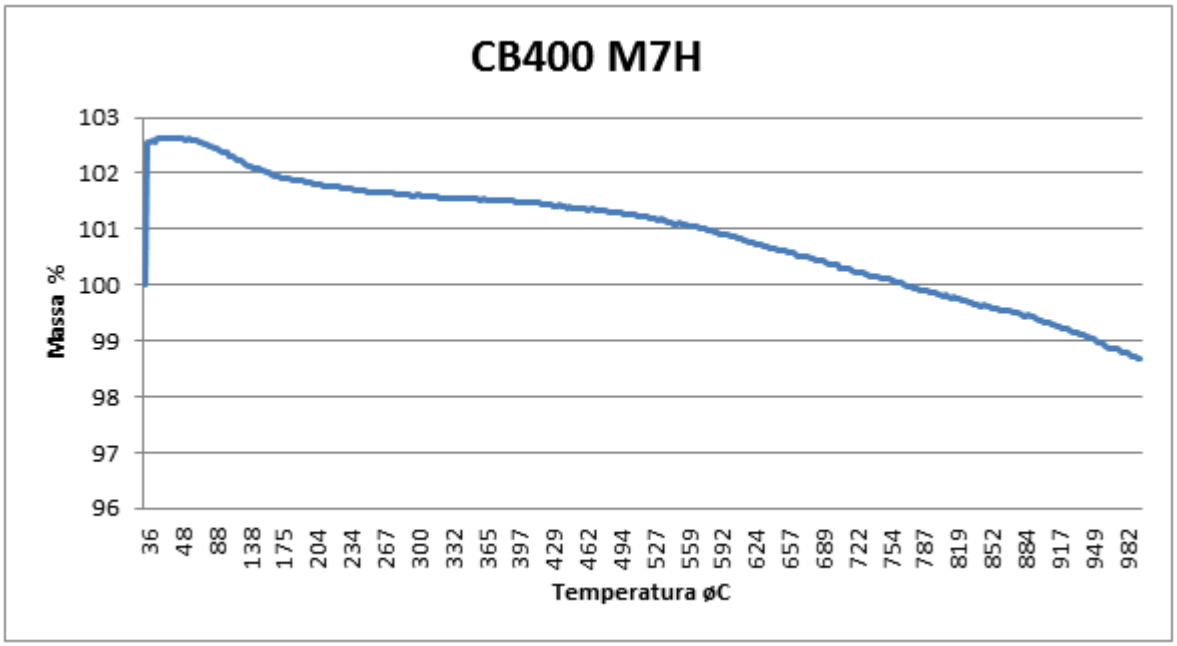
Fonte: O autor (2016).

GRÁFICO 10 – Termogravimetria CB 300 M7H



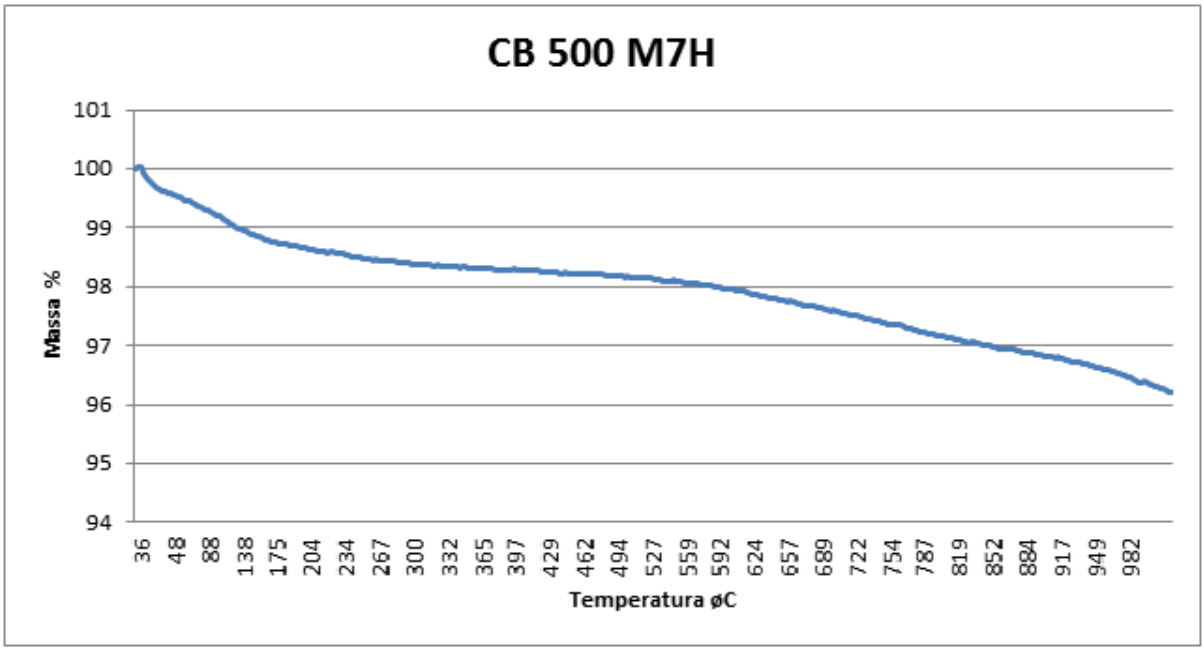
Fonte: O autor (2016).

GRÁFICO 11 – Termogravimetria CB 400 M7H



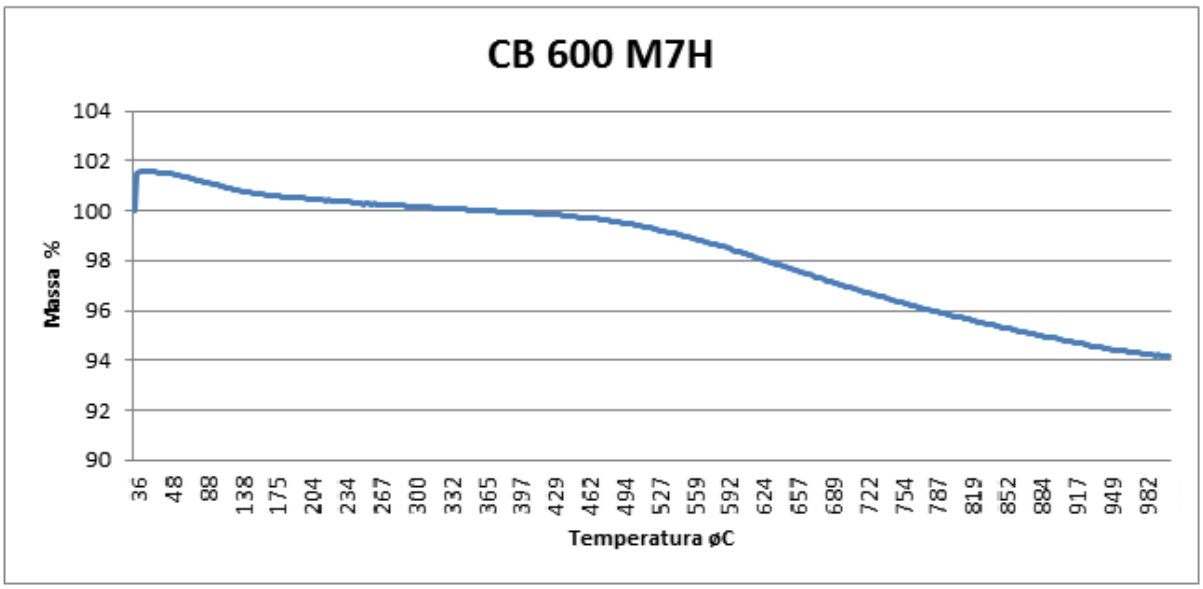
Fonte: O autor (2016).

GRÁFICO 12 – Termogravimetria CB 500 M7H



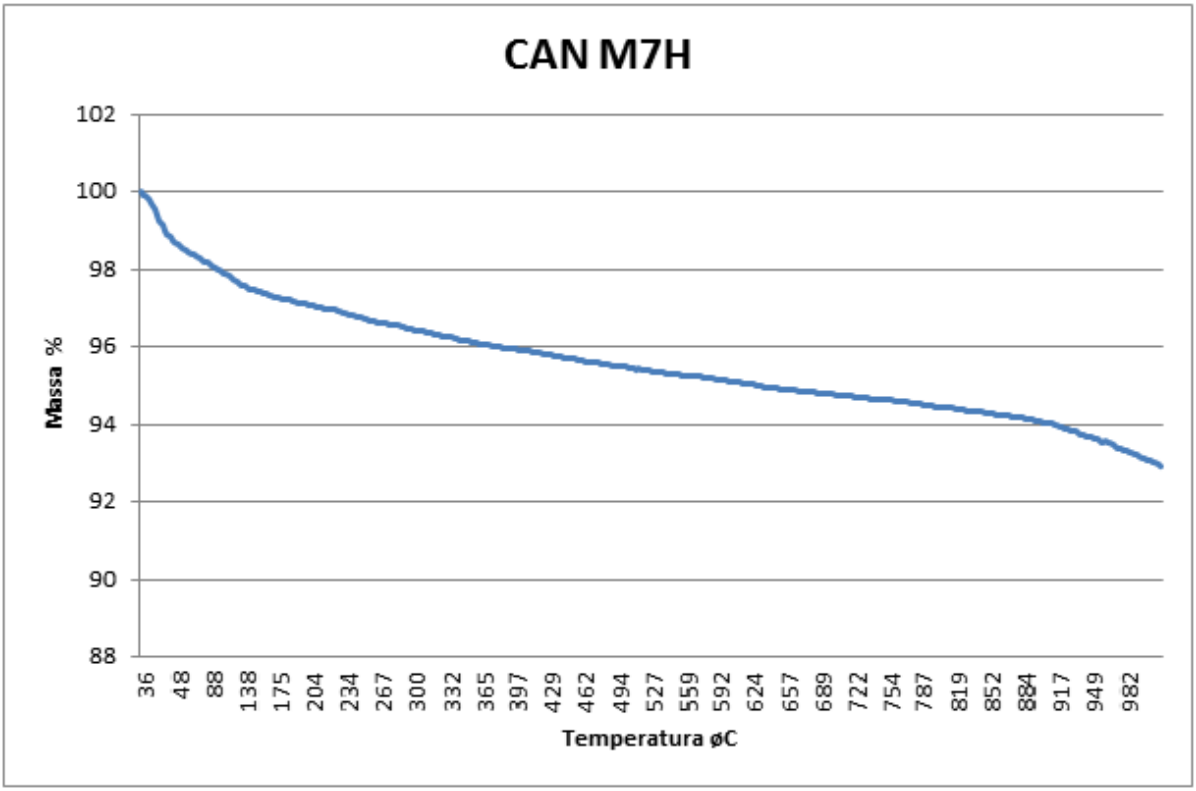
Fonte: O autor (2016).

GRÁFICO 13 – Termogravimetria CB 600 M7H



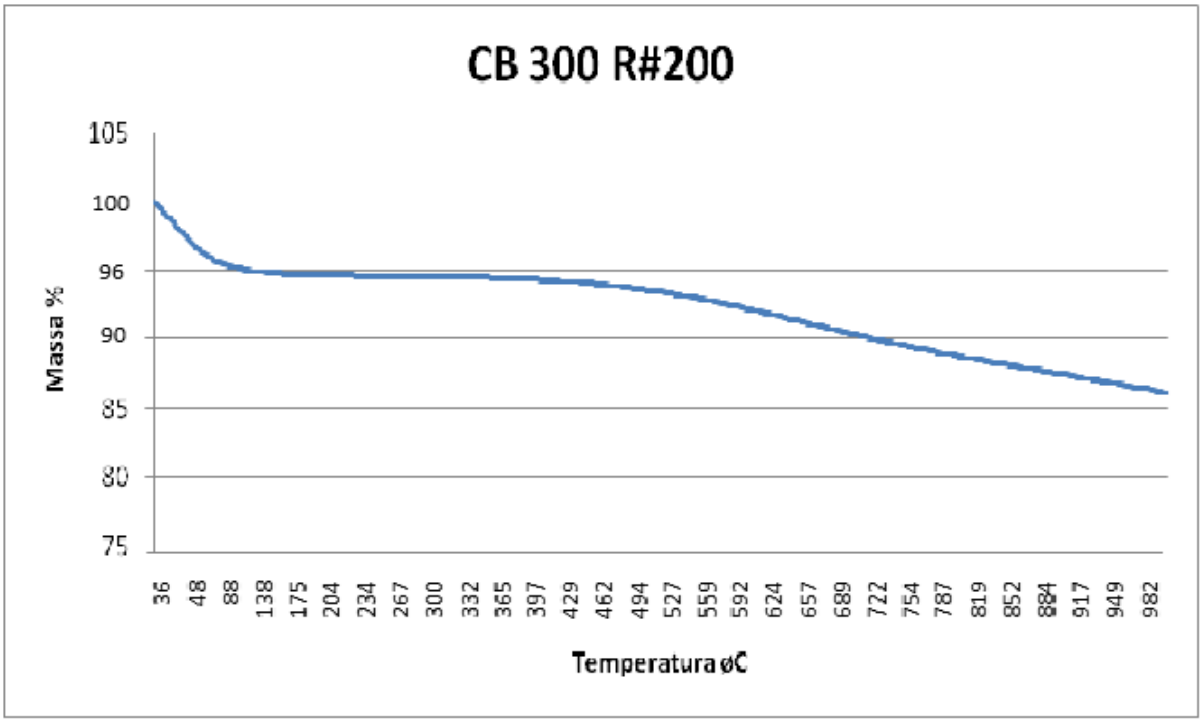
Fonte: O autor (2016).

GRÁFICO 14 – Termogravimetria CAN M7H



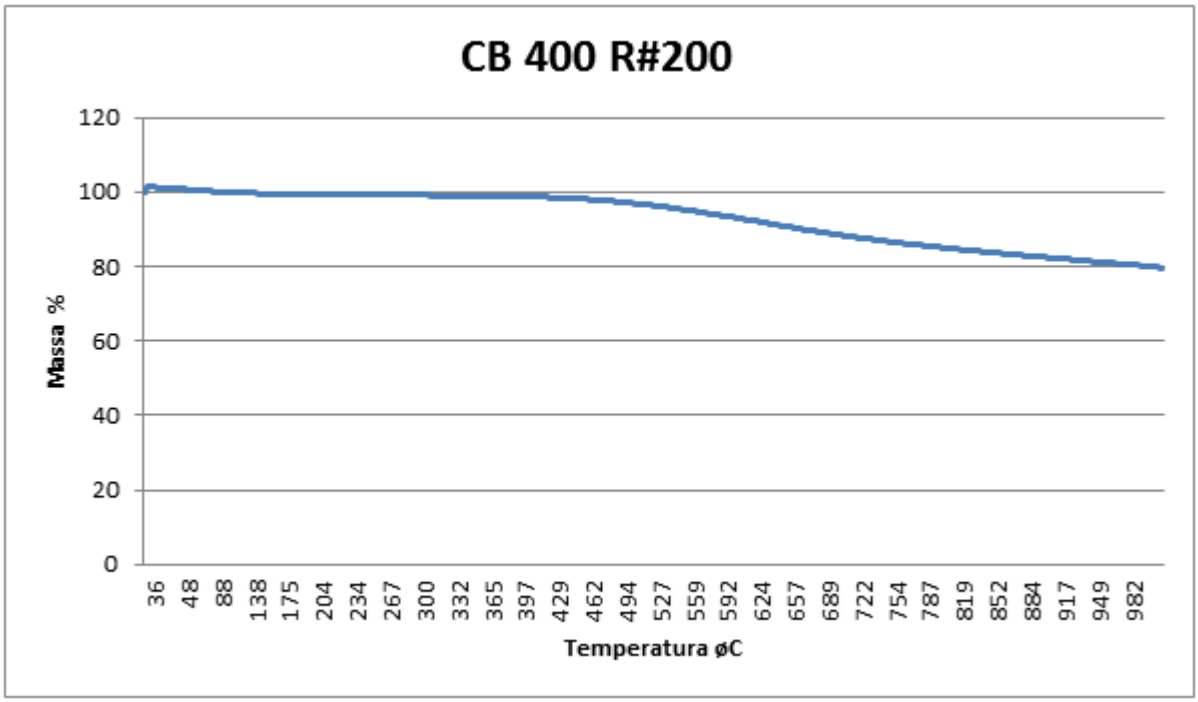
Fonte: O autor (2016).

GRÁFICO 15 – Termogravimetria CB 300 R#200



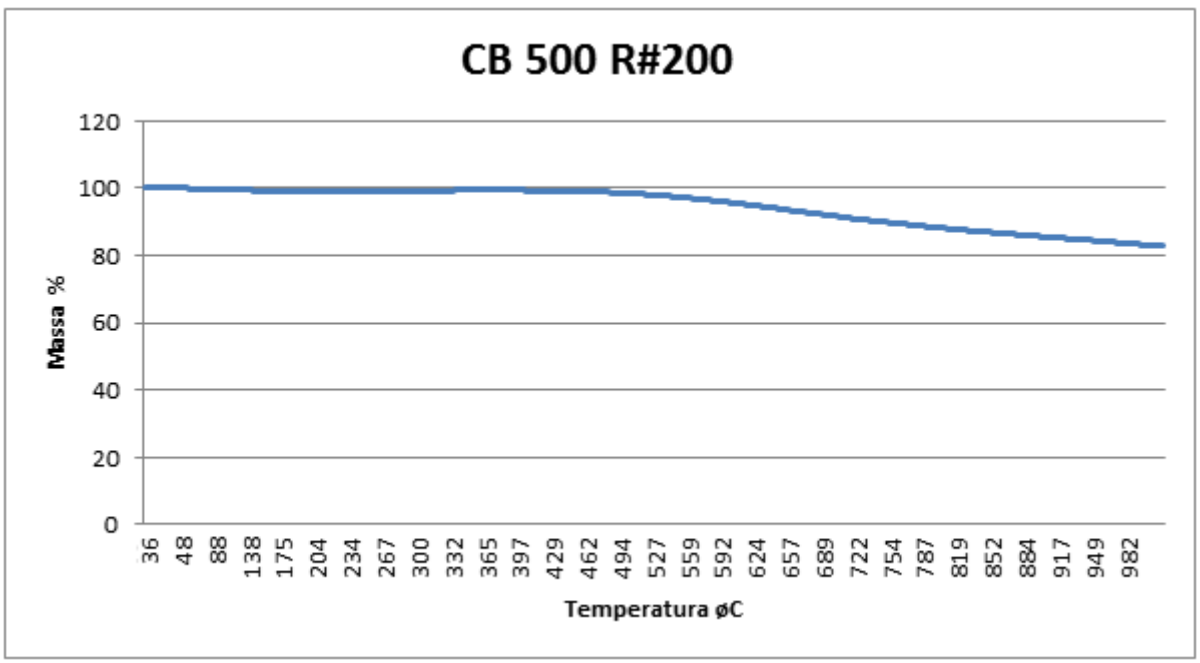
Fonte: O autor (2016).

GRÁFICO 16 – Termogravimetria CB 400 R#200



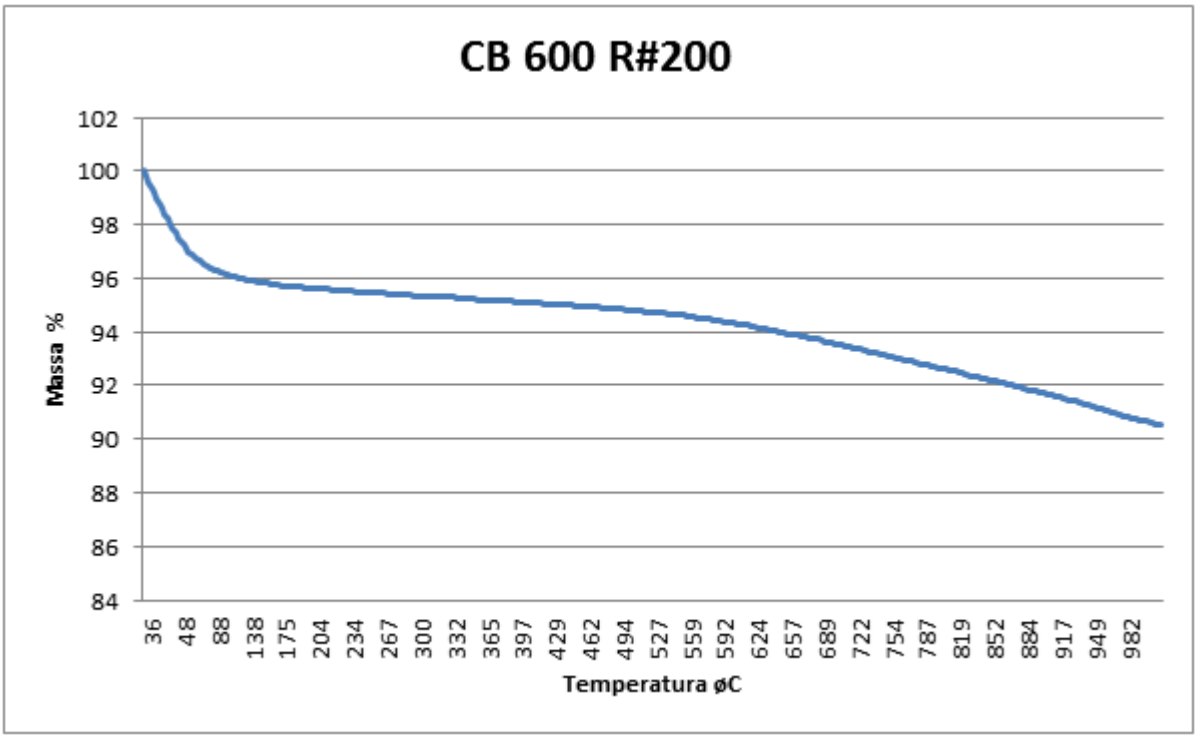
Fonte: O autor (2016).

GRÁFICO 17 – Termogravimetria CB 500 R#200



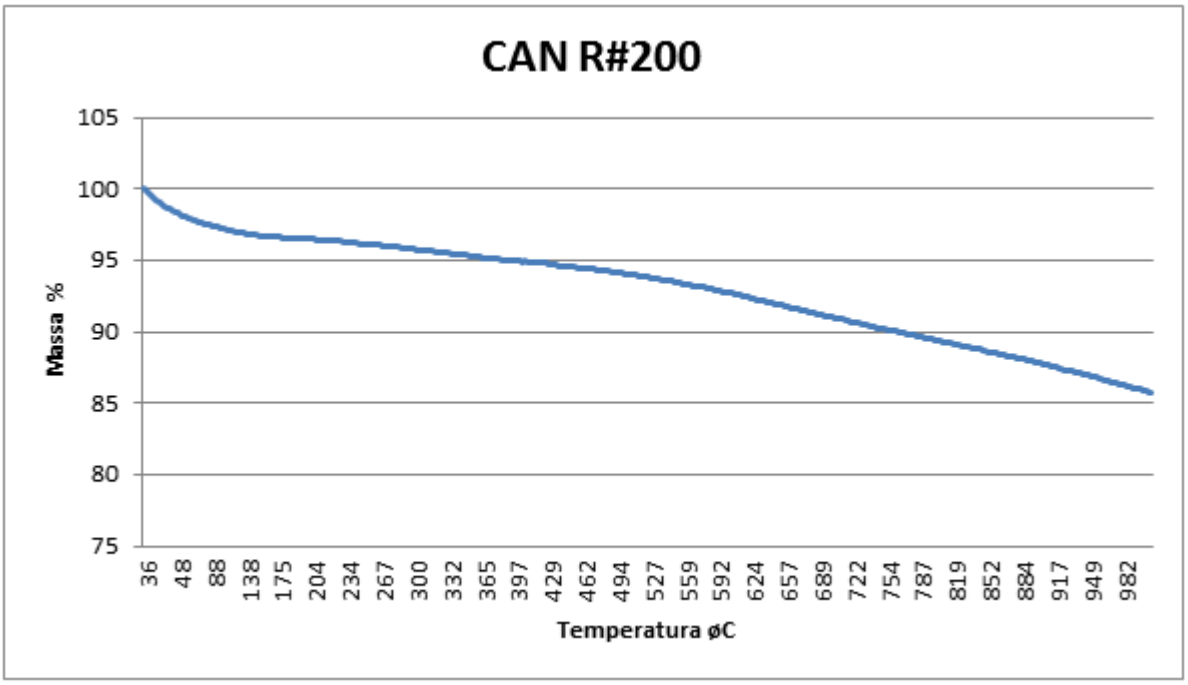
Fonte: O autor (2016).

GRÁFICO 18 – Termogravimetria CB 600 R#200



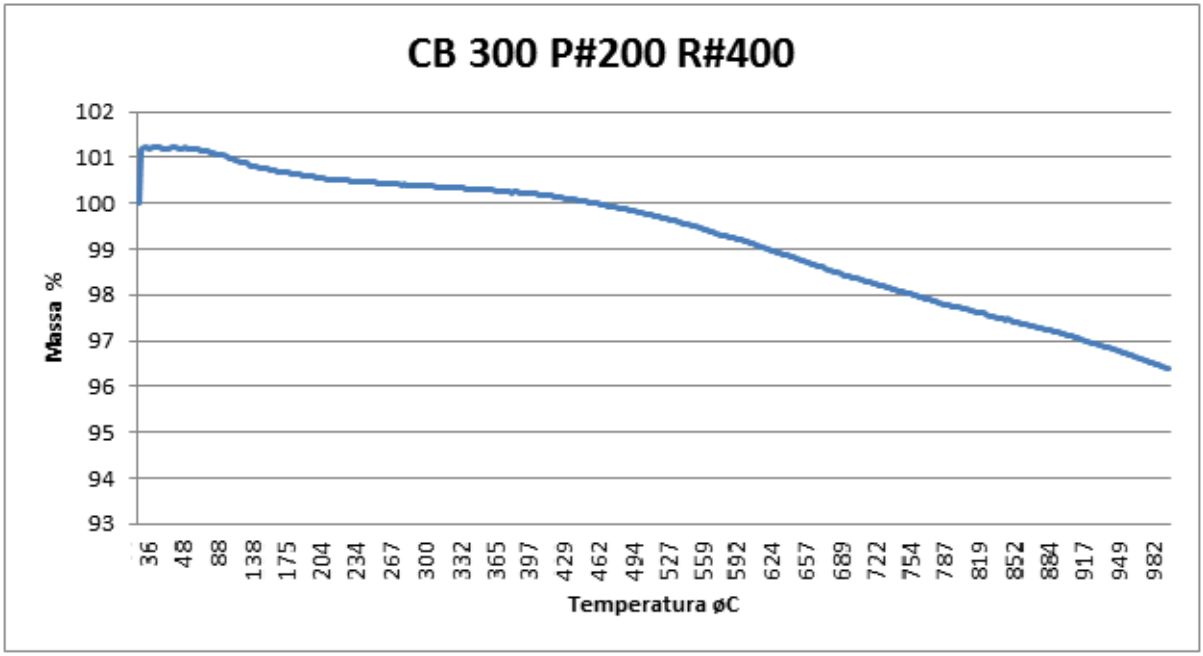
Fonte: O autor (2016).

GRÁFICO 19 – Termogravimetria CAN R#200



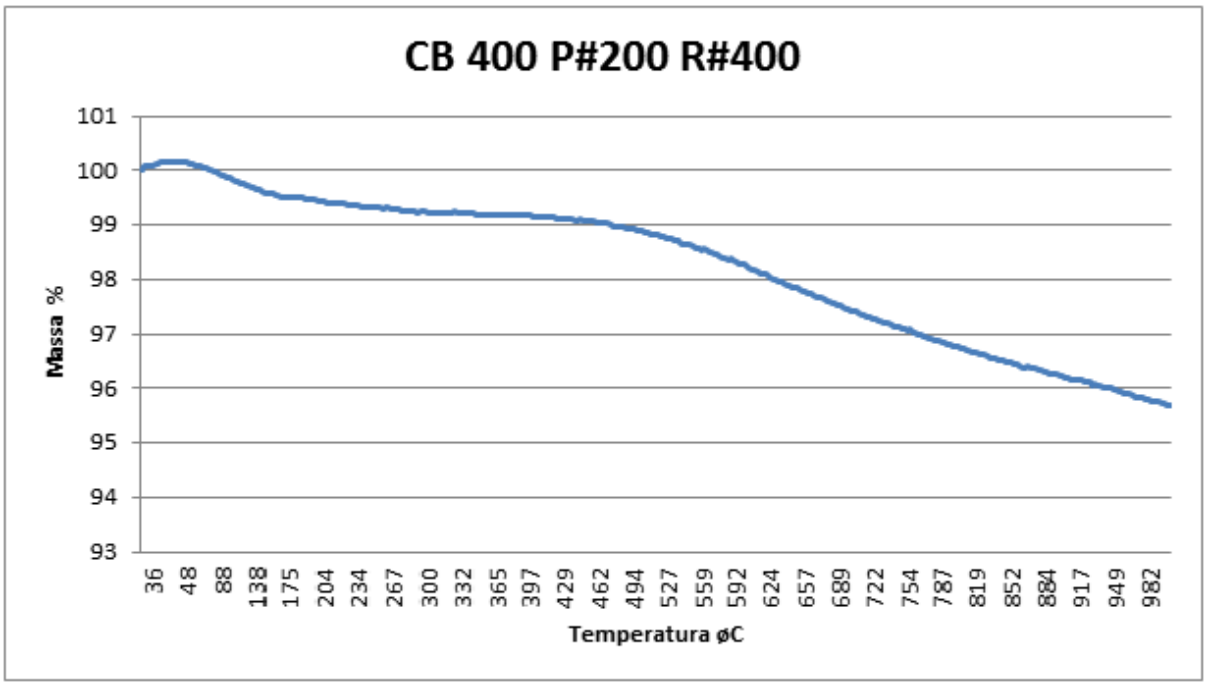
Fonte: O autor (2016).

GRÁFICO 20 – Termogravimetria CB 300 P#200 R#400



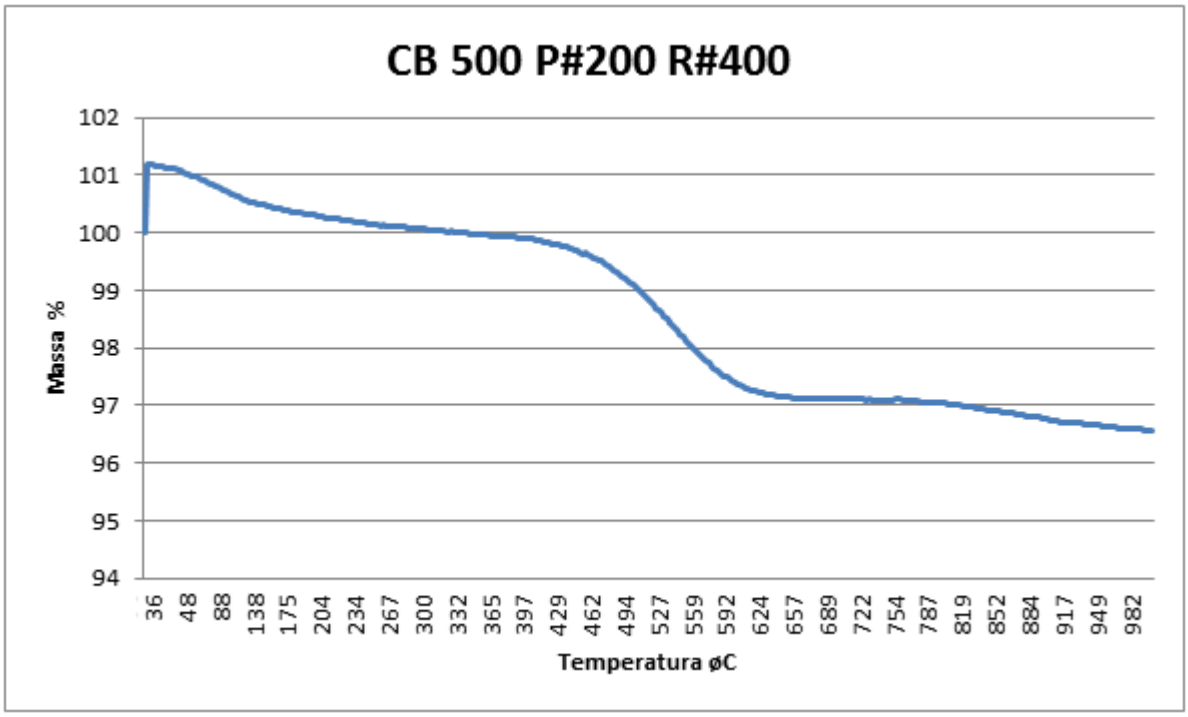
Fonte: O autor (2016).

GRÁFICO 21 – Termogravimetria CB 400 P#200 R#400



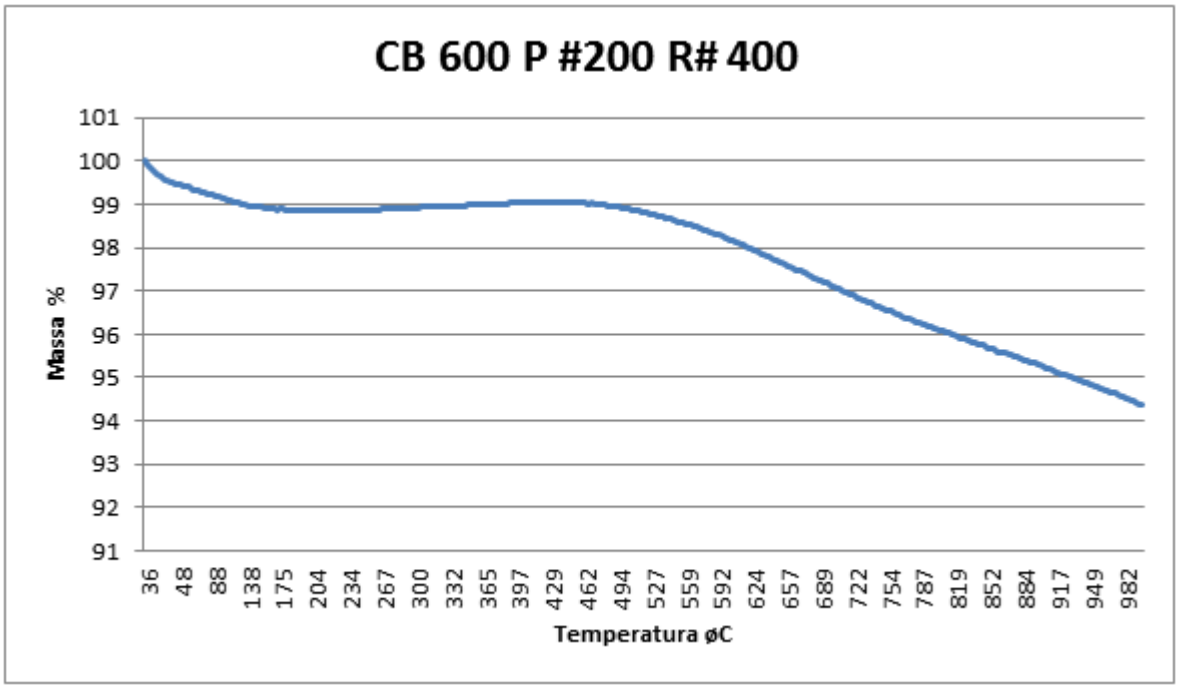
Fonte: O autor (2016).

GRÁFICO 22 – Termogravimetria CB 500 P#200 R#400



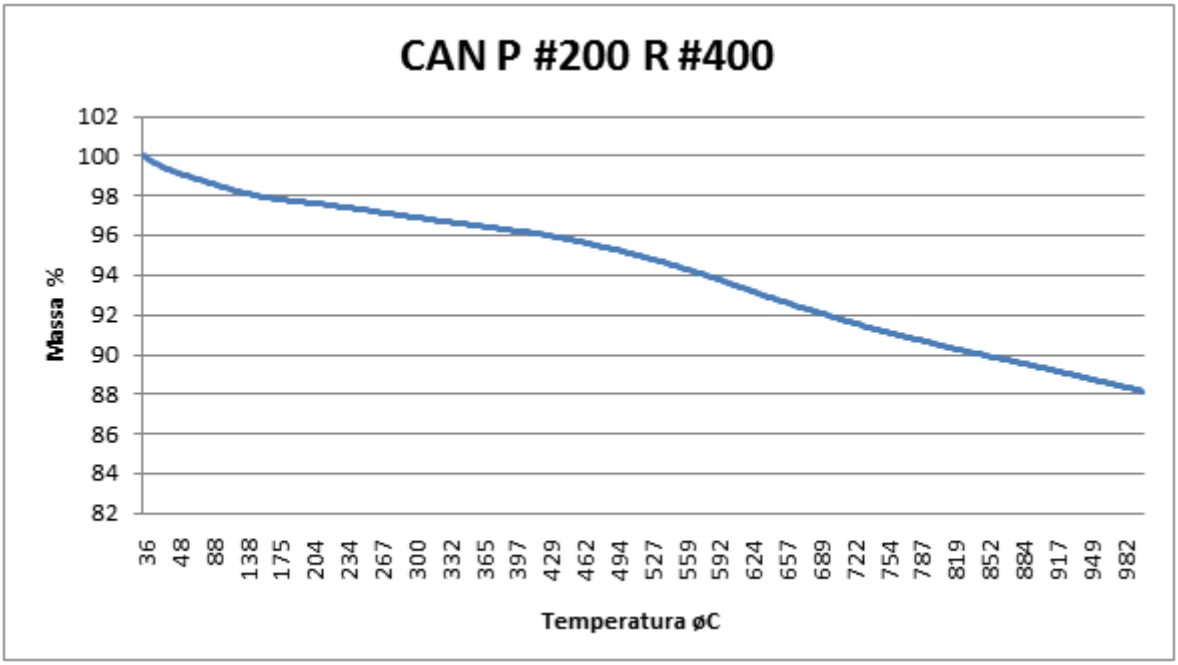
Fonte: O autor (2016).

GRÁFICO 23 – Termogravimetria CB 600 P#200 R#400



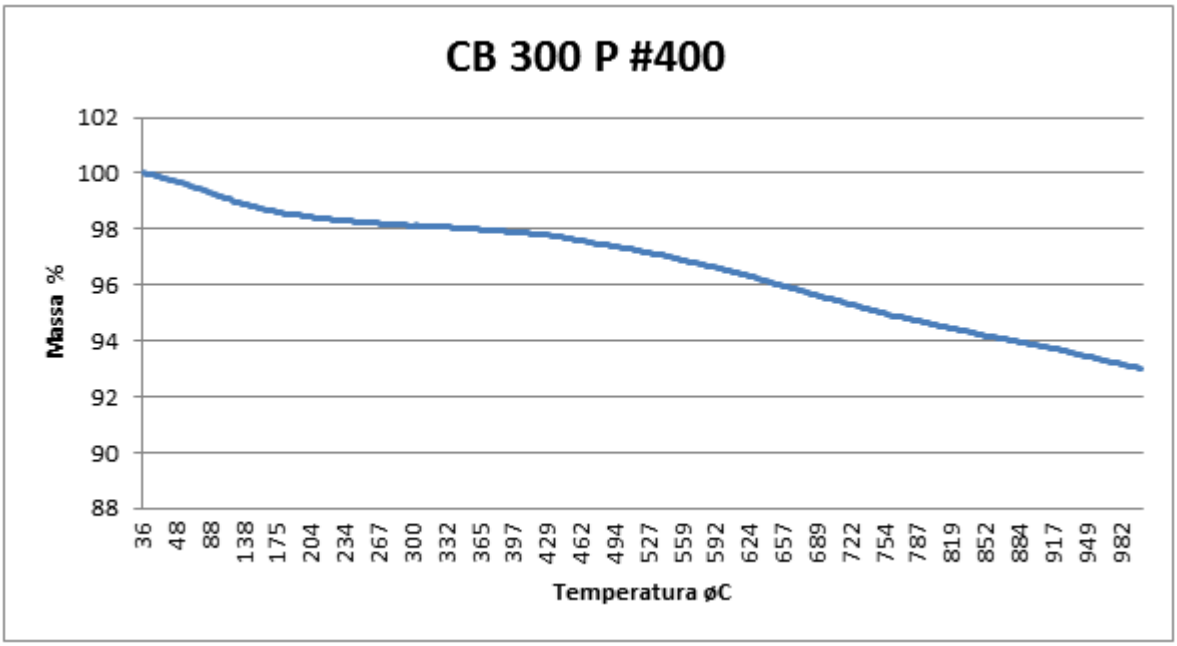
Fonte: O autor (2016).

GRÁFICO 24 – Termogravimetria CAN P#200 R#400



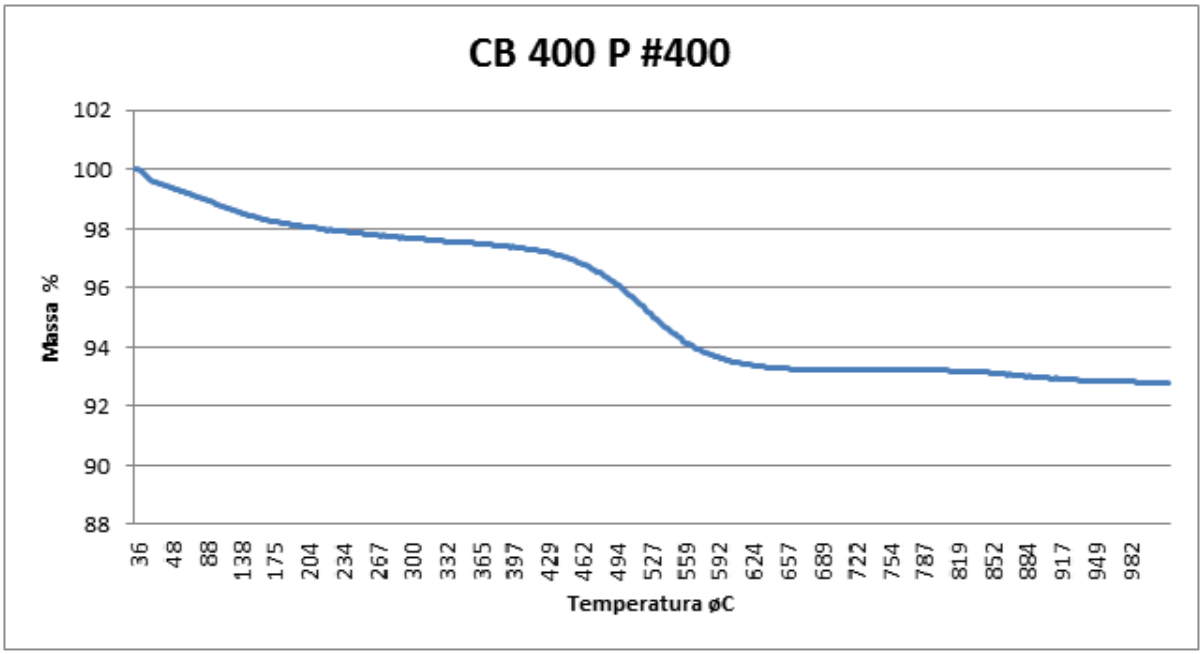
Fonte: O autor (2016).

GRÁFICO 25 – Termogravimetria CB 300 P#400



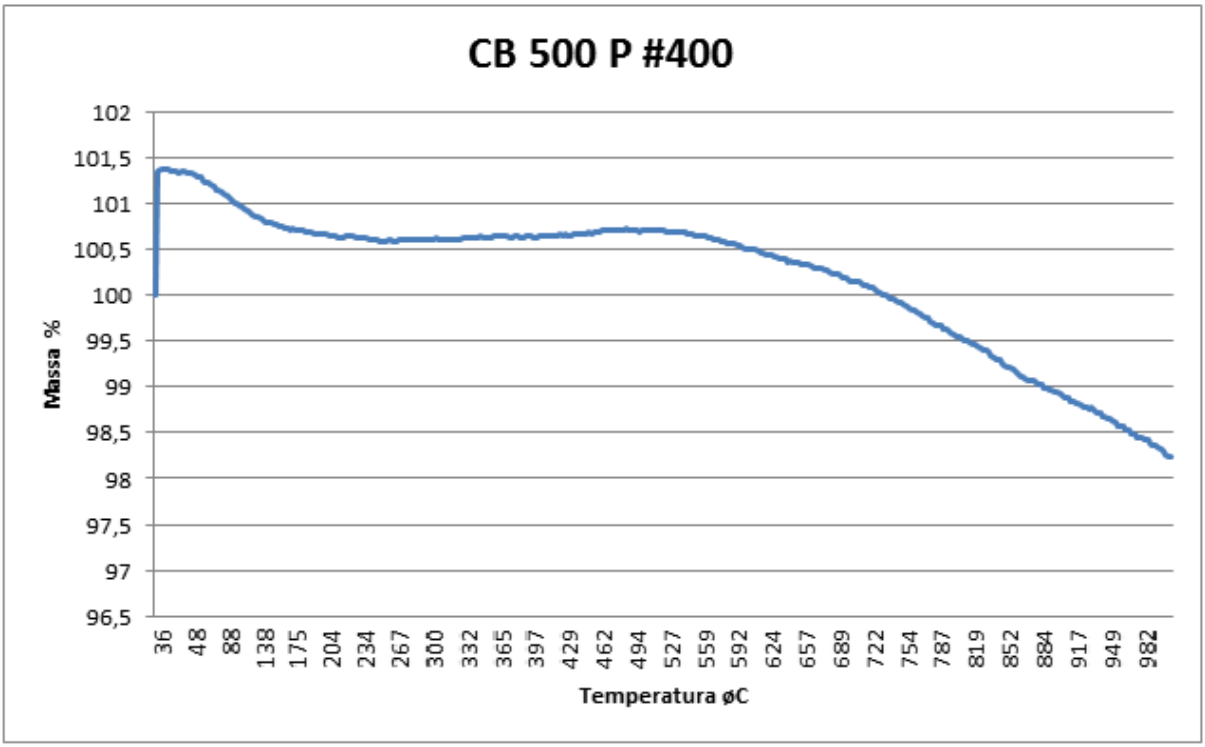
Fonte: O autor (2016).

GRÁFICO 26 – Termogravimetria CB 400 P#400



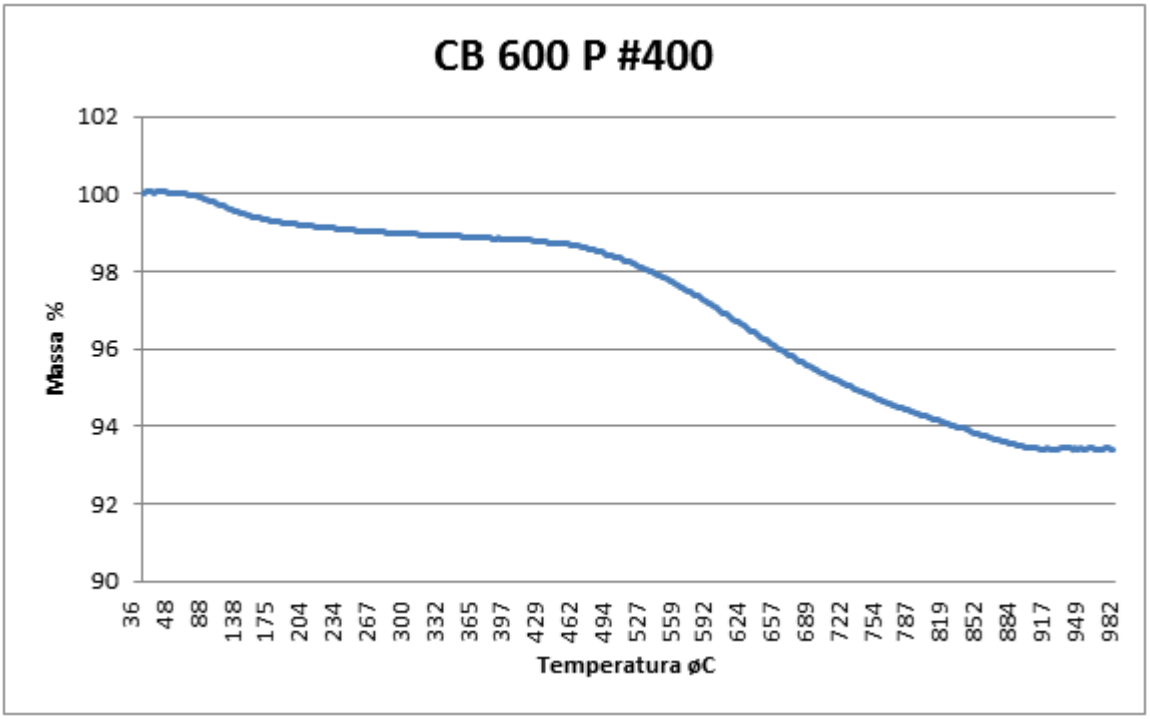
Fonte: O autor (2016).

GRÁFICO 27 – Termogravimetria CB 500 P#400



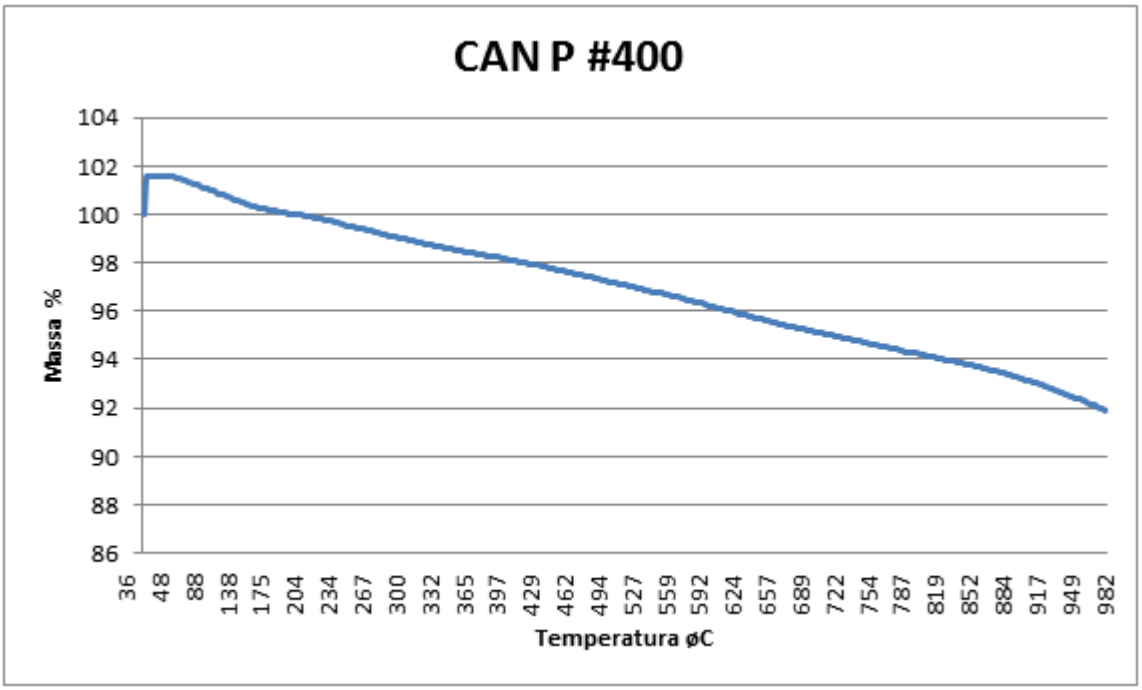
Fonte: O autor (2016).

GRÁFICO 28– Termogravimetria CB 600 P#400



Fonte: O autor (2016).

GRÁFICO 29 – Termogravimetria CAN P#400

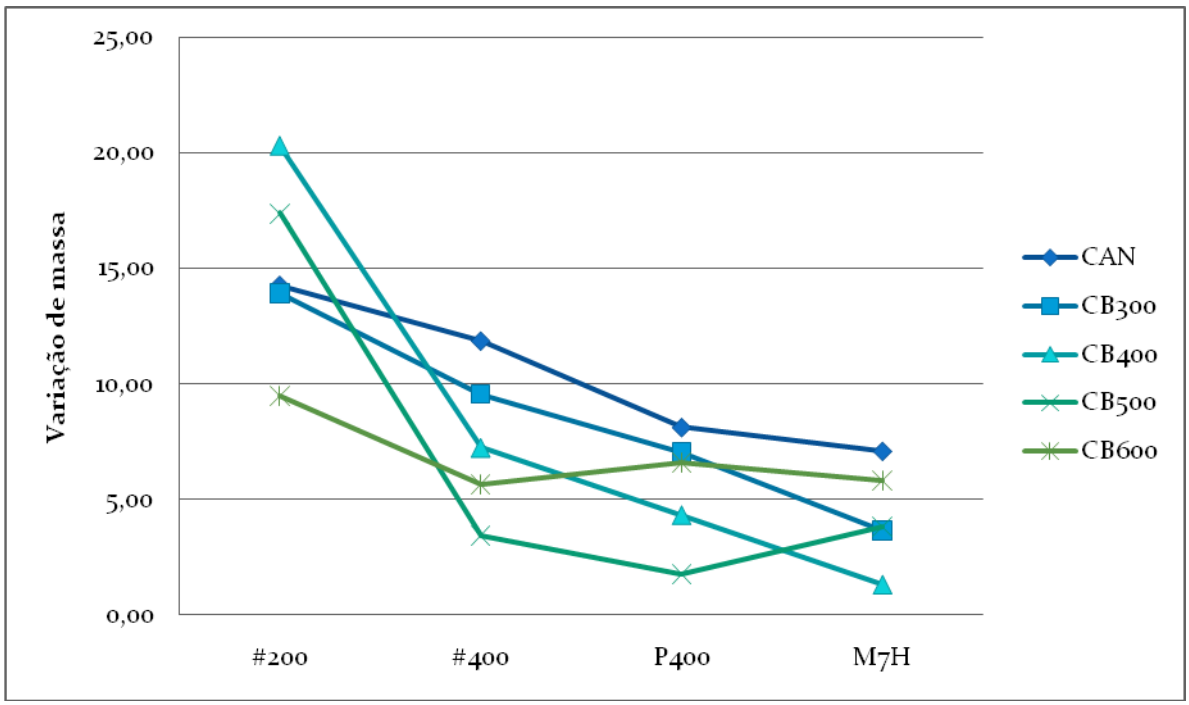


Fonte: O autor (2016).

Em relação à perda de massa, a curva termogravimétrica apontou perda de massa em todas as amostras estudadas, porem o aumento da temperatura de calcinação das cinzas, de 300 a 600 °C, provocou a diminuição da matéria orgânica, localizada na perda de massa entre 300 e 600 graus no ensaio de termogravimetria

O Gráfico 30 ilustra a variação de massa das amostras em função ao tratamento térmico e de peneiramento/moagem, nele pode-se observar que de forma geral quanto maior o modulo de finura da amostra menor a variação de massa e também que nos tratamentos térmicos da CB 300 a CB 500, quanto maior foi a temperatura de calcinação menor foi a variação de massas.

GRÁFICO 30 – Variação de massa em função do tratamento térmico e de peneiramento/moagem



Fonte: O autor (2016).

4.3 ANÁLISE DE ATIVIDADE POZOLÂNICA ABNT NBR 5751 (2012)

A Tabela 13 e o Gráfico 31 mostram os resultados obtidos durante a realização dos ensaios de compressão dos corpos-de-prova.

TABELA 13 - Quadro resumo das propriedades das argamassas de cal hidratada com metacaulim e cinza do bagaço de cana-de-açúcar. Moldagem de 3 corpos-de-prova.

Mistura	$Ca(OH)_2$ (g)	MTC / CBCA (g)	Areia (g)	Água (g)	Consist. média (mm)	a/agl	Adit. (%)	Resist. Comp. (MPa)	IAC (%)
MTC	104,00	232,45	936,00	309,53	220,00	0,92	0,8	**13,17**	**221,28**
CAN#200	104,00	181,38	936,00	199,77	211,50	0,7	0,2	0,28	4,67
CAN#400		202,08		214,93	209,00			0,62	10,33
CANP400		203,05		214,26	201,25			0,70	11,67
CANM7H		209,45		219,41	190,25			**7,97**	**132,84**
CB300#200	104,00	178,15	936,00	197,51	229,75	0,7	0,2	0,42	7,00
CB300#400		207,76		218,23	222,25			1,42	23,67
CB300P400		211,50		220,85	188,50			1,89	31,50
CB300M7H		215,00		223,3	180,00			**9,52**	**158,67**
CB400#200	104,00	186,84	936,00	203,59	200,00	0,7	0,2	0,38	6,33
CB400#400		212,62		221,64	178,50			1,42	23,67
CB400P400		212,94		221,86	186,75			1,56	26,00
CB400M7H		219,63		226,54	236,50			**7,03**	**117,17**
CB500#200	104,00	184,93	936,00	202,25	214,50	0,7	0,2	0,24	4,00
CB500#400		214,09		222,67	179,50			1,58	26,33
CB500P400		216,70		224,49	180,32			1,60	26,67
CB500M7H		220,37		227,06	193,50			**9,52**	**158,67**
CB600#200	104,00	189,29	936,00	205,30	222,50	0,7	0,2	0,24	4,00
CB600#400		206,96		217,68	205,25			0,75	12,50
CB600P400		210,83		220,38	187,00			1,53	25,50
CB600M7H		213,96		222,57	181,75			**6,79**	**113,17**

Fonte: O autor (2016).

Segundo a norma NBR 5751 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2012) que regulamenta os ensaios de resistência mecânica à compressão prevê um resultado mínimo de 6,0 MPa para esse ensaio.

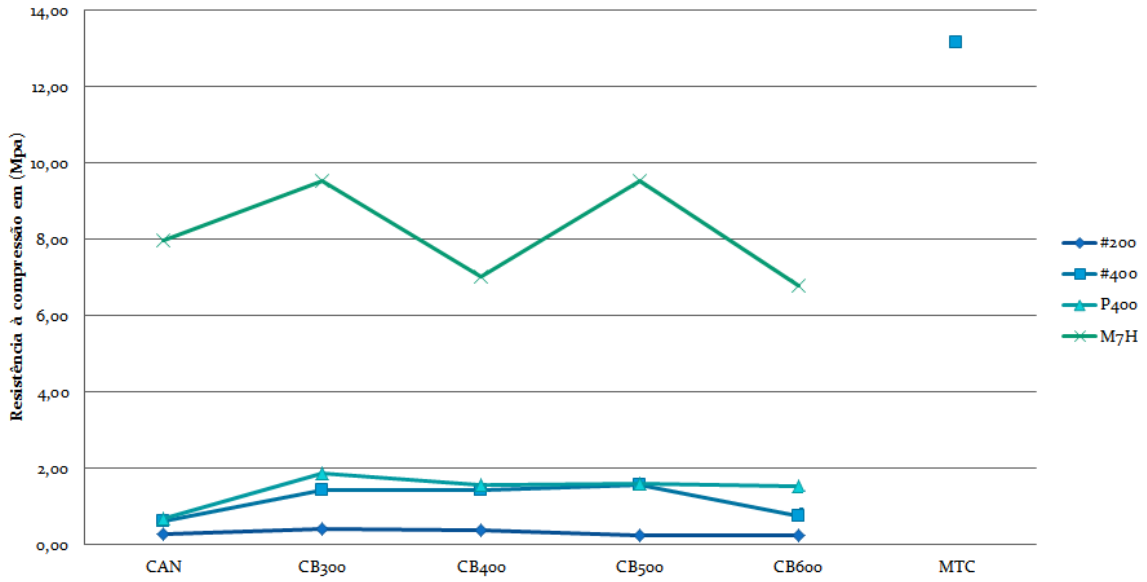
Para a moldagem dos corpos de prova ficou estabelecida a relação de agua/aglomerante de 0,7, com exceção do material pozolânico de referencia.

O resultado dos ensaios realizados mostra que a maioria das amostras se encontram abaixo do valor estabelecido pela NBR 5751 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2012) com exceção das amostras de cinza moídas por 7 horas e do material de referência, onde todas elas ficaram acima do valor desejado.

Com isso pode-se dizer que as amostras que apresentaram melhores resultados e que mais se aproximaram do material de referencia foram as cinzas moídas por 7 horas.

4.3.1 Efeitos da calcinação

GRÁFICO 31 - Resistência à compressão em (MPa) das CBCA e do MTC em função do tratamento de Calcinação.



Fonte: O autor (2016).

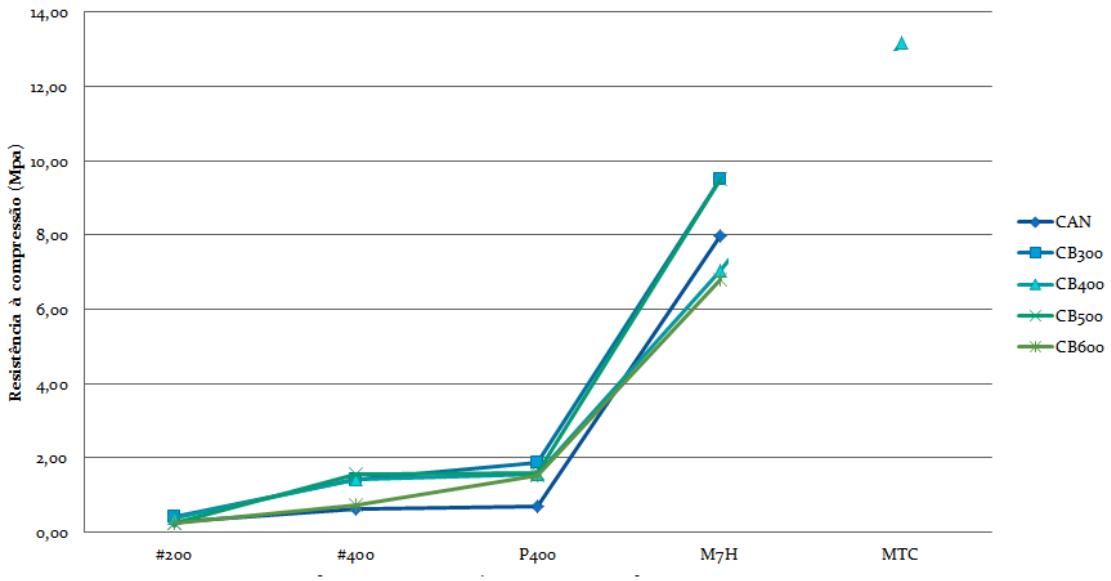
O Gráfico 31 mostra que o tratamento térmico pouco influenciou nos resultados, há apenas uma pequena variação na resistência à compressão quando se observa os índices dentro de uma mesma faixa de peneiramento/moagem, a CBCA in natura apresenta na média resultados piores do que aqueles obtidos nas cinzas calcinadas.

Os resultados obtidos nas cinzas calcinadas mostram que na maioria dos casos a que apresentou resultados mais satisfatórios foi a de 300°, onde a média da resistência à compressão foi maior que as demais, com exceção da CB500 retida na peneira #400.

Desta forma o tratamento térmico utilizado não teve a contribuição desejada na atividade pozolânica da CBCA

4.3.2 Efeitos do peneiramento / moagem

GRÁFICO 32 – Resistência à compressão em (MPa) das CBCA e do MTC em função do tratamento de peneiramento / moagem.



Fonte: O autor (2016).

Diferente da calcinação o gráfico acima mostra que o peneiramento/moagem teve *g*rande influencia nos resultados obtidos, na maioria dos casos quanto menor a finura do material maior a sua resistência à compressão.

O material retido na peneira #200 apresentou os piores resultados tendo uma média de 0,31MPa, quanto ao material passante na peneira #200 e retido na peneira #400 foi obtida a

media de 1,16 MPa, o passante da peneira #440 ficou com 3,64 Mpa e por fim os corpos-de-prova que foram moldados com as cinzas moídas por 7 horas ficaram com a média de 8,17 MPa.

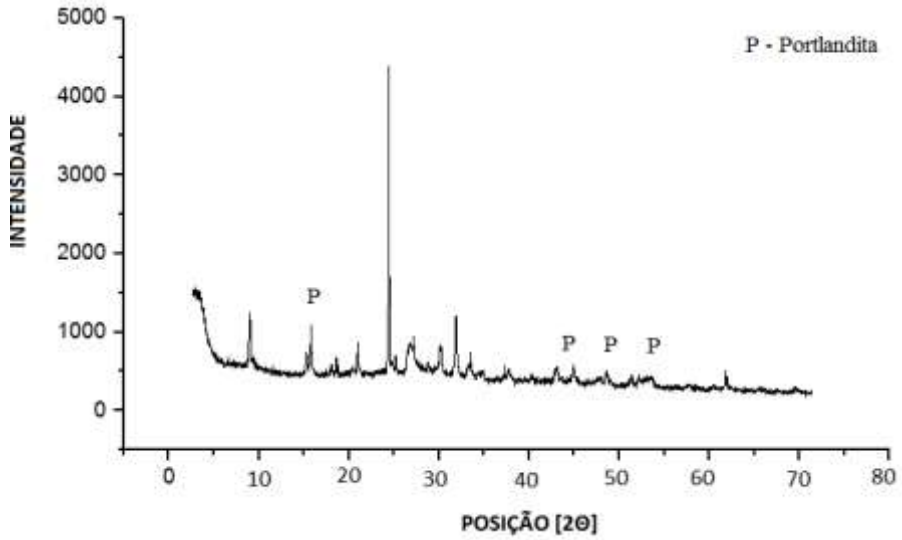
Os resultados obtidos corroboram que a moagem do material é de extrema importância na atividade pozolânica e que contribuem de forma significativa no ganho de resistência.

4.4 ANÁLISE DE ATIVIDADE POZOLÂNICA POR DIFRAÇÃO DE RAIO-X

Para este ensaio foi utilizado os corpos-de-prova moldados conforme o item 3.4.3, que foram mantidos por 24 horas a uma temperatura de 23°C e depois durante 144 horas foram colocados na estufa a 55°Cpara depois serem congelados.

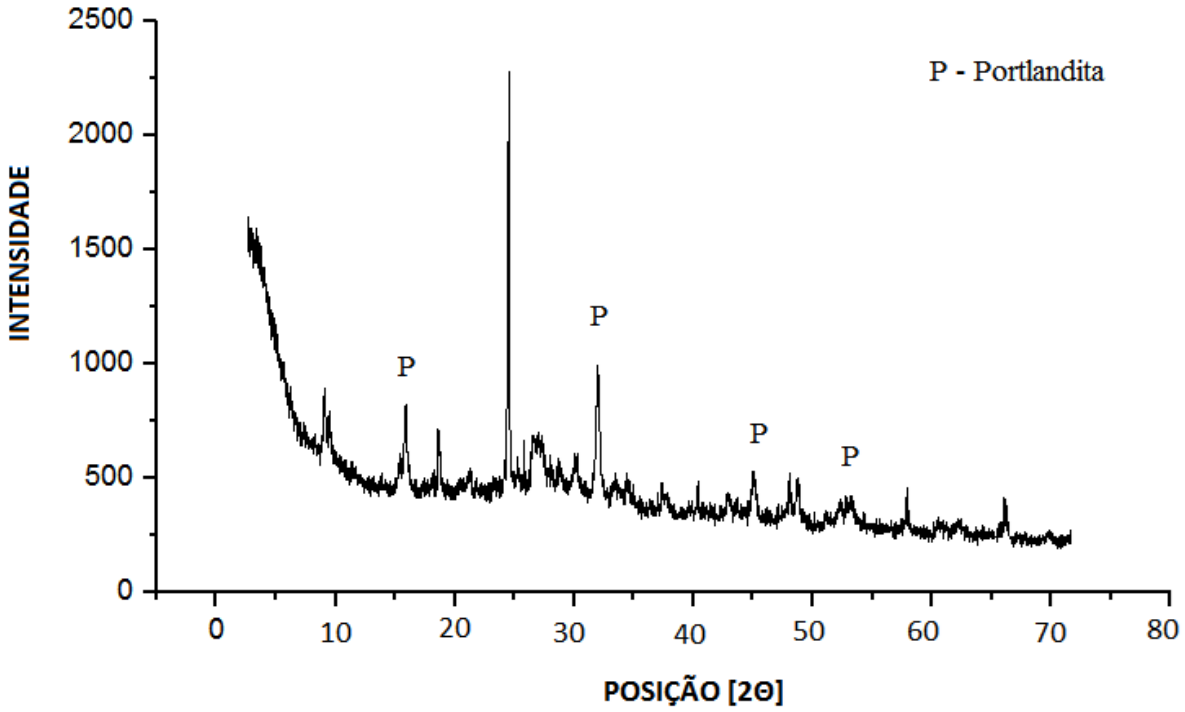
Os corpos-de-prova foram congelados por 8 dias, depois disso eles passaram pelo processo de liofilização para retirar a água e afim de evitar a carbonatação eles foram colocados em um dessecador com sílica gel e hidróxido de bário até a data da realização da DRX (GRÁFICOS 33 até 54).

GRÁFICO 33 – Difração de raios-X da CAN R#200



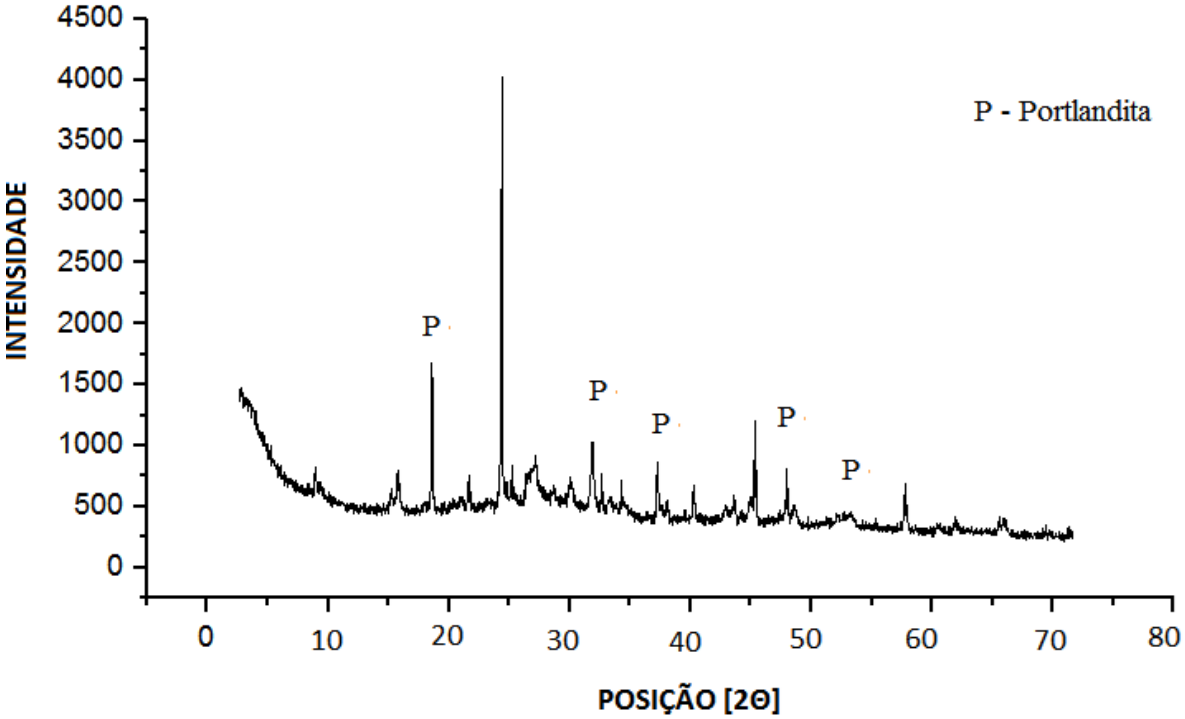
Fonte: O autor (2016).

GRÁFICO 34 – Difração de raios-X da CAN P#200 R#400



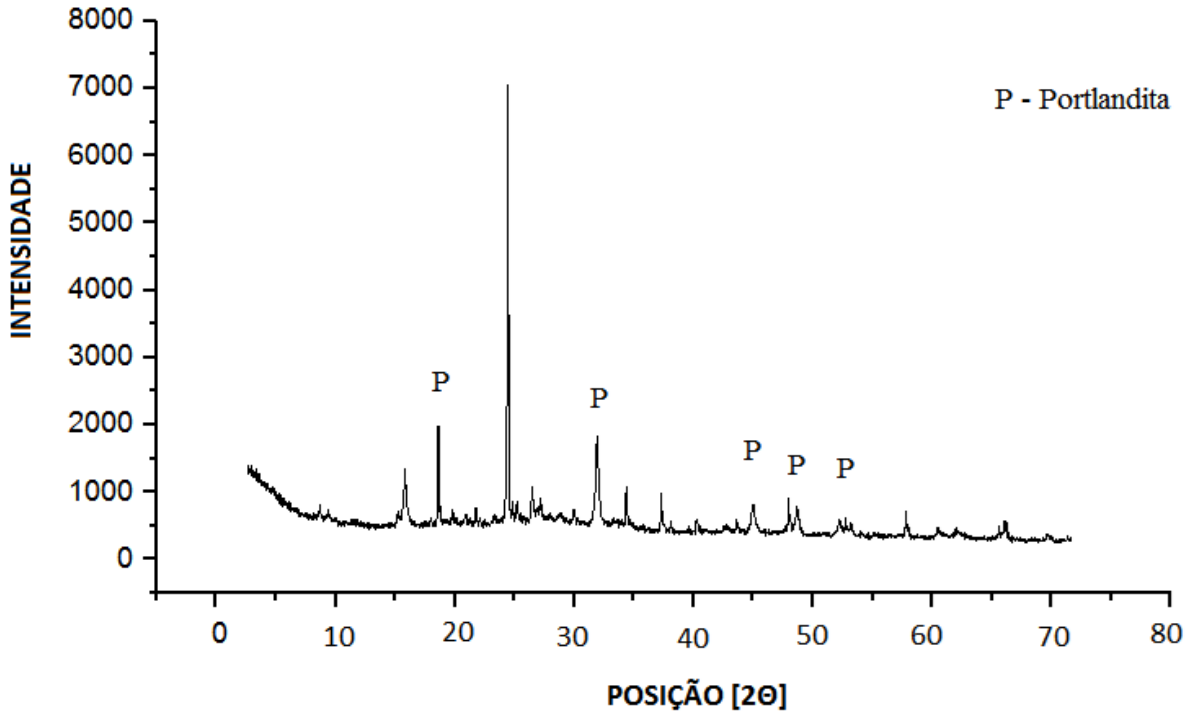
Fonte: O autor (2016).

GRÁFICO 35 –Difração de raios-X da CAN P#400



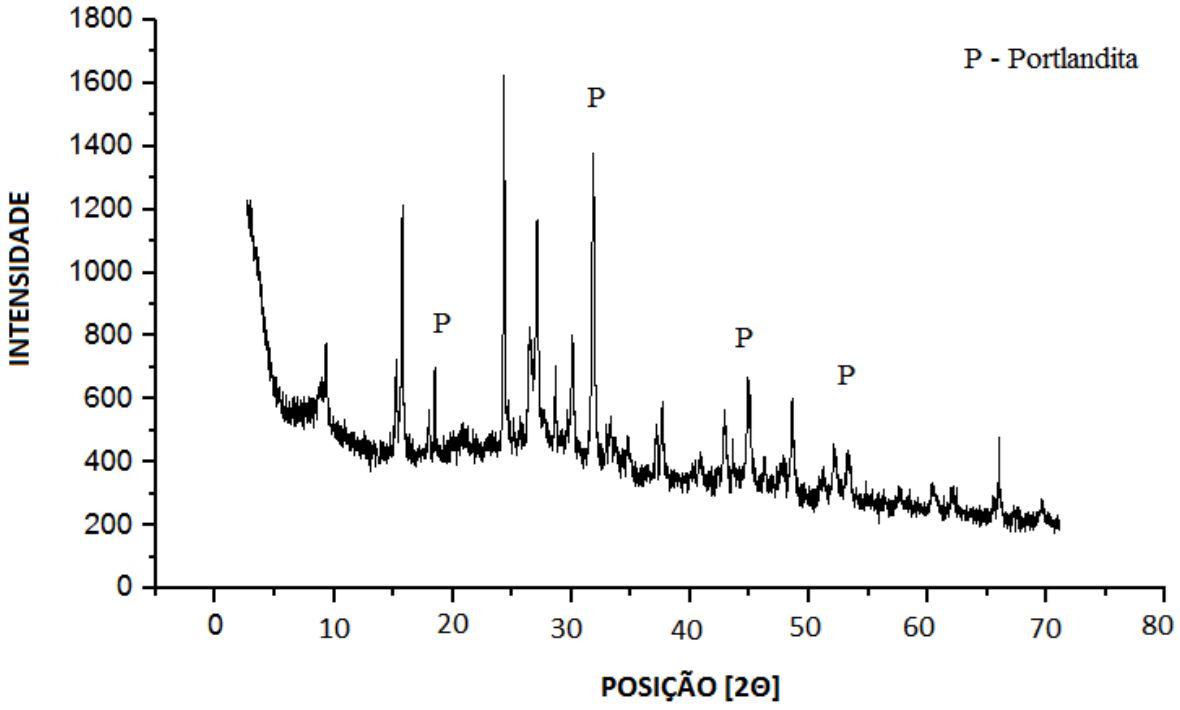
Fonte: O autor (2016).

GRÁFICO 36 – Difração de raios-X da CAN M7H



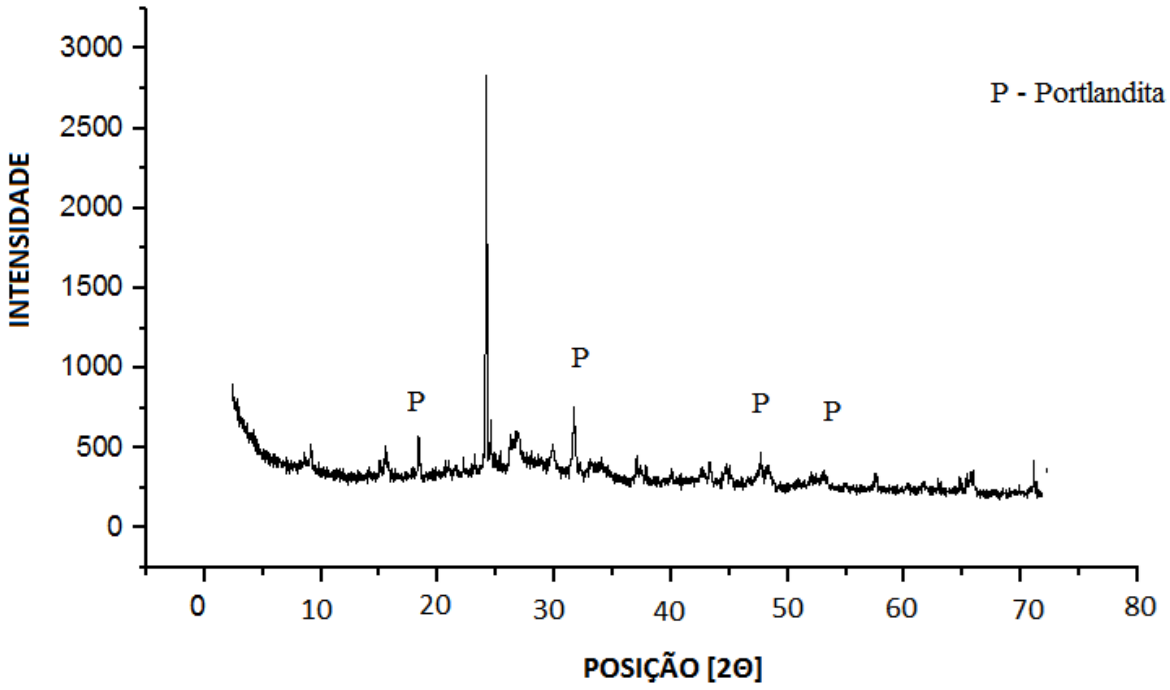
Fonte: O autor (2016).

GRÁFICO 37 – Difração de raios-X da CB300 R#200



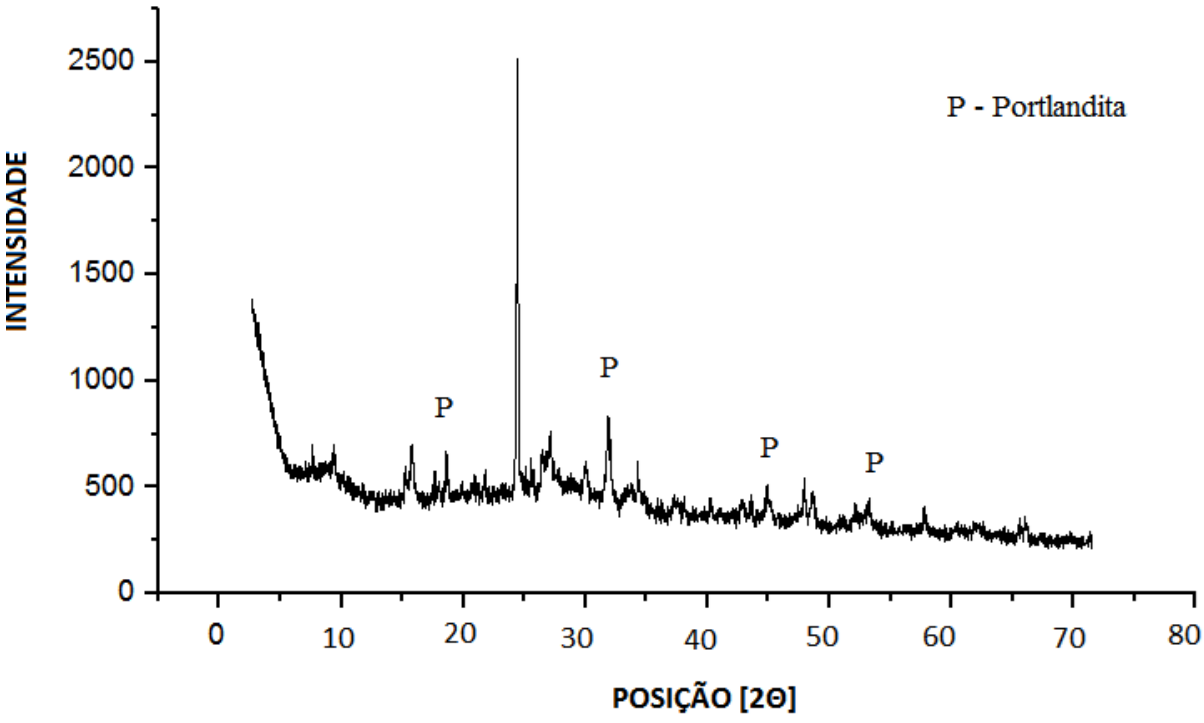
Fonte: O autor (2016).

GRÁFICO 38 – Difração de raios-X da CB300 P#200 R#400



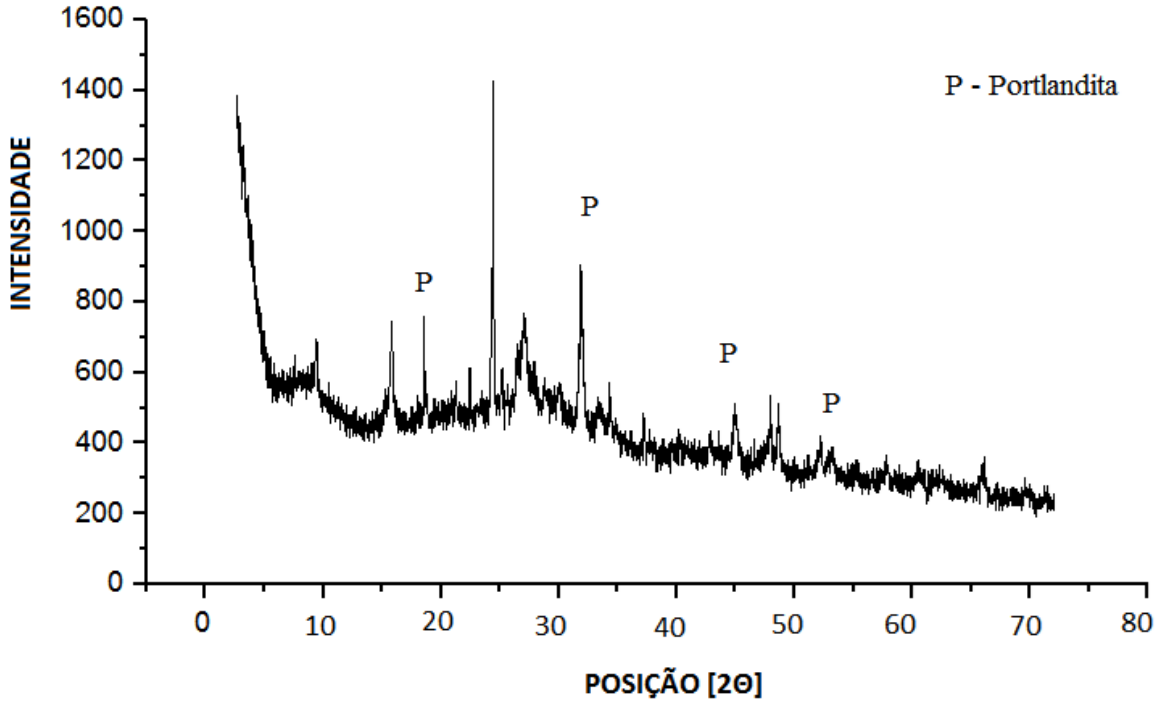
Fonte: O autor (2016).

GRÁFICO 39 – Difração de raios-X daCB300 P#400



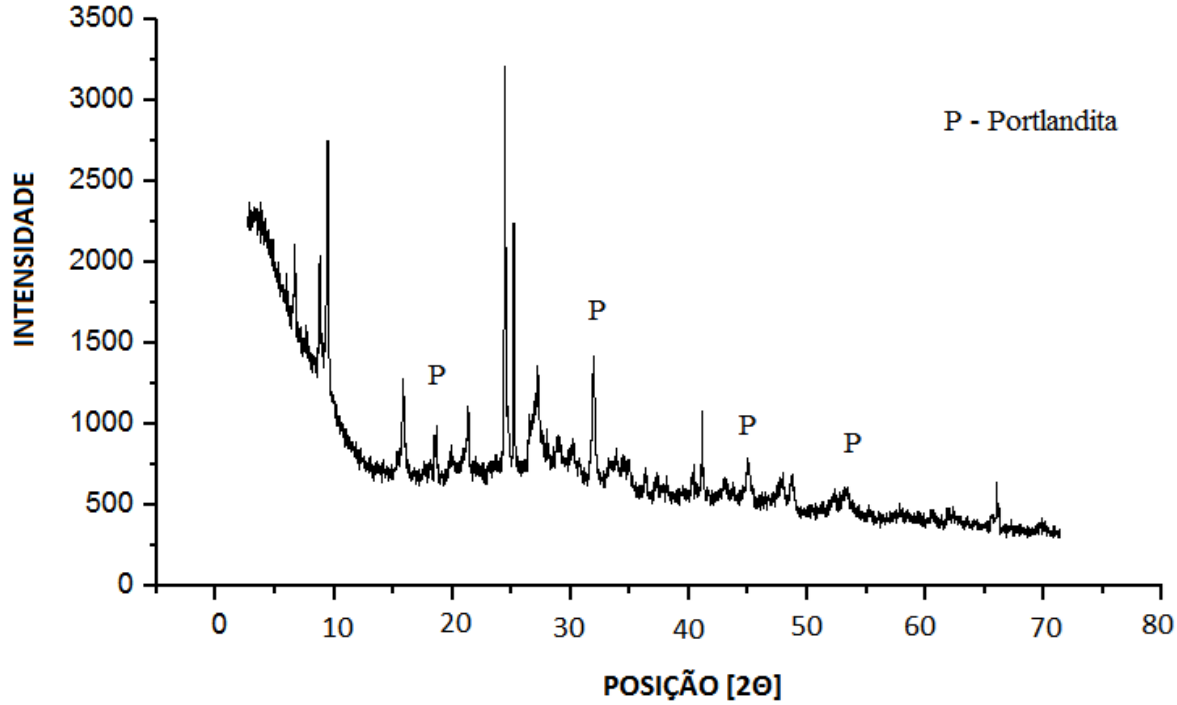
Fonte: O autor (2016).

GRÁFICO 40 – Difração de raios-X da CB300 M7H



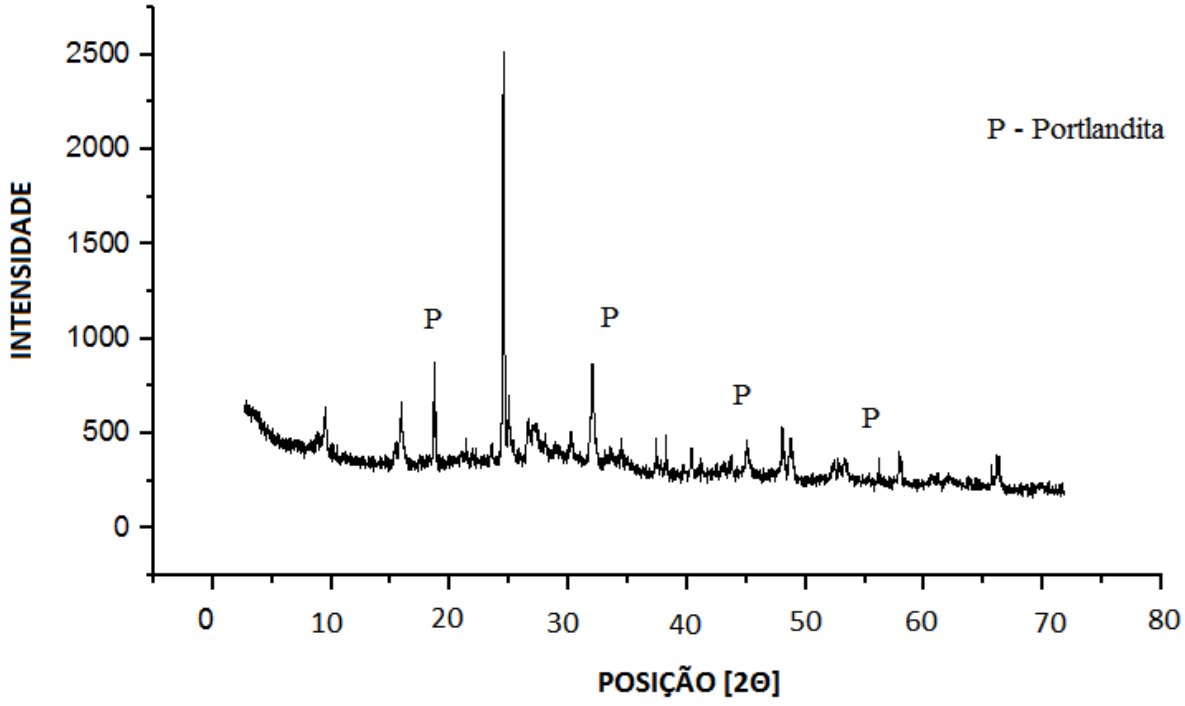
Fonte: O autor (2016).

GRÁFICO 41 – Difração de raios-X da CB400 R#200



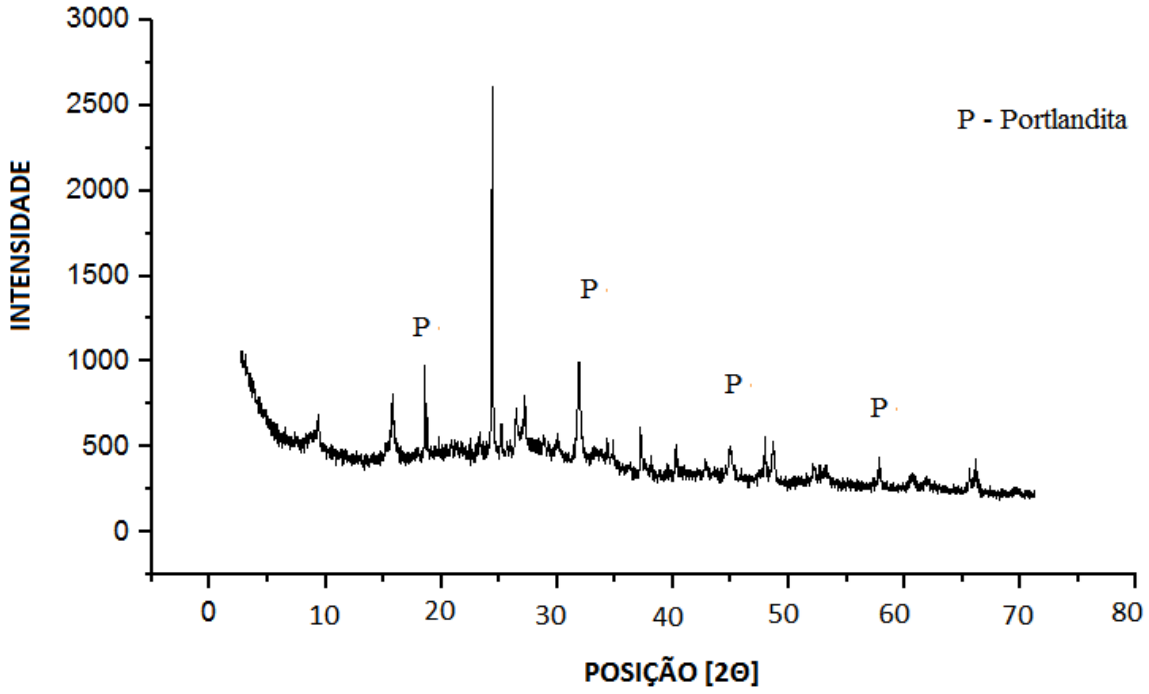
Fonte: O autor (2016).

GRÁFICO 42 –Difração de raios-X da CB400 P#200 R#400



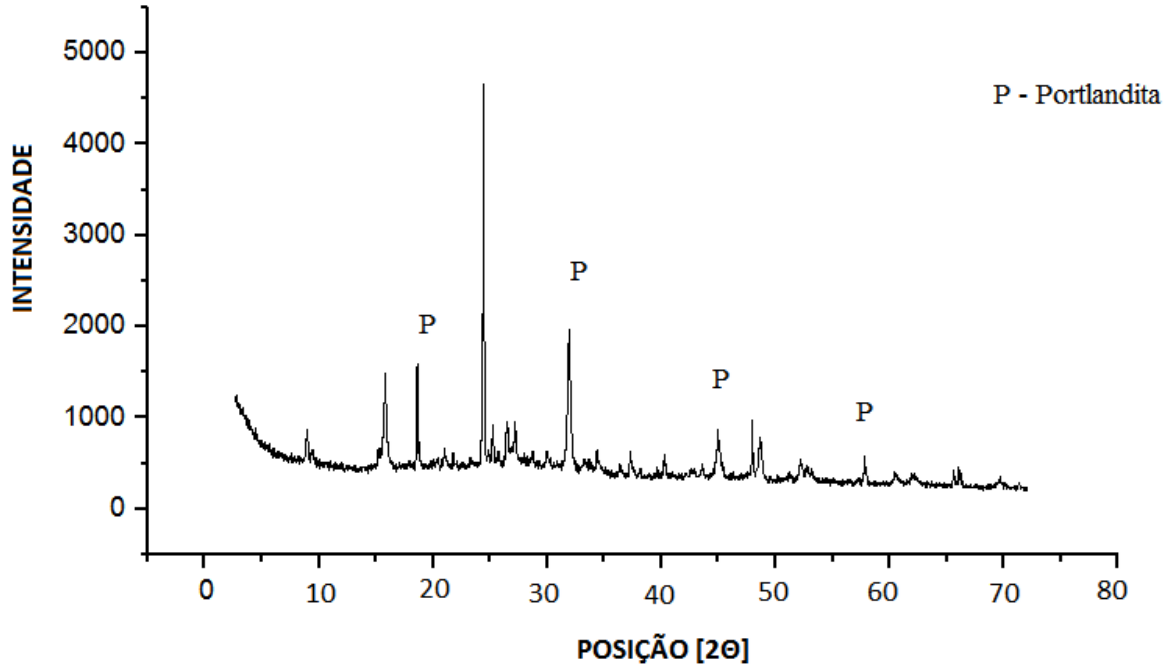
Fonte: O autor (2016).

GRÁFICO 43 – Difração de raios-X da CB400 P#400



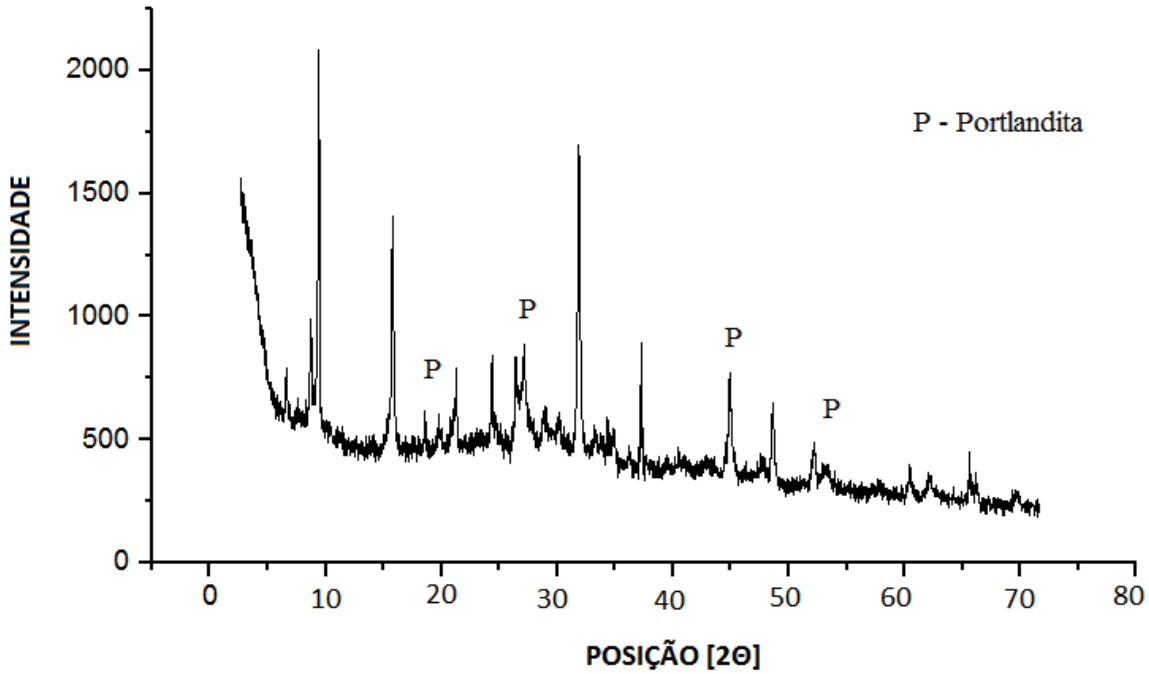
Fonte: O autor (2016).

GRÁFICO 44 – Difração de raios-X da CB400 M7H



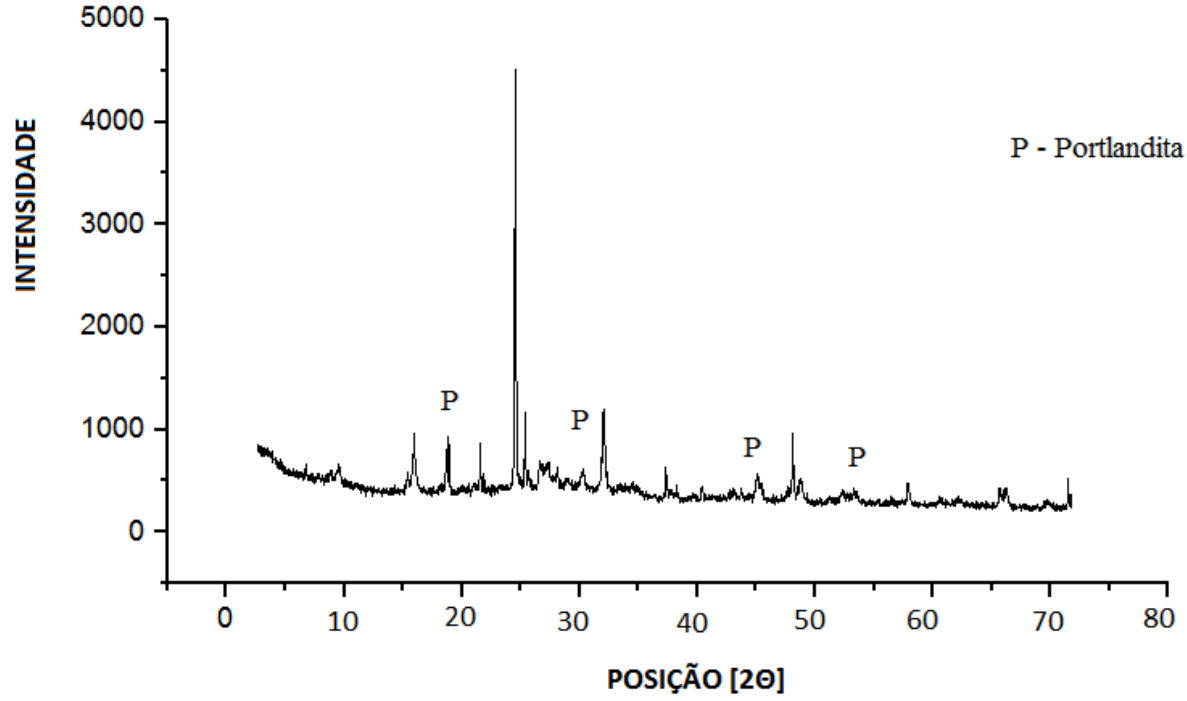
Fonte: O autor (2016).

GRÁFICO 45 – Difração de raios-X da CB500 R#200



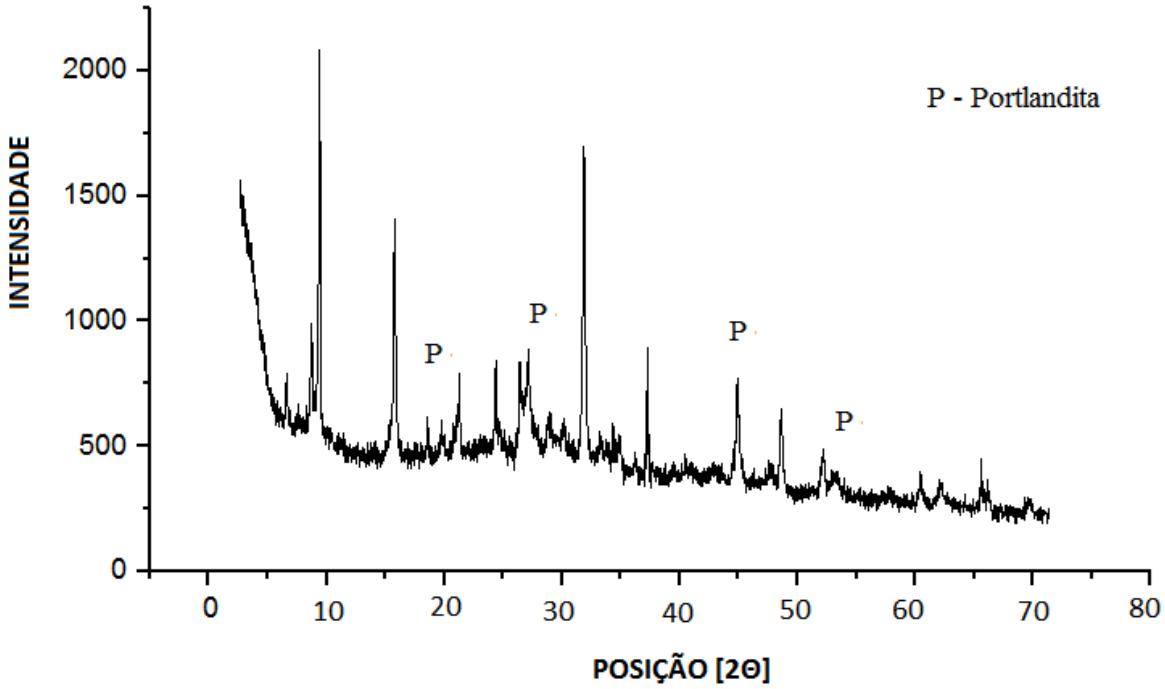
Fonte: O autor (2016).

GRÁFICO 46 – Difração de raios-X da CB500 P#200 R#400



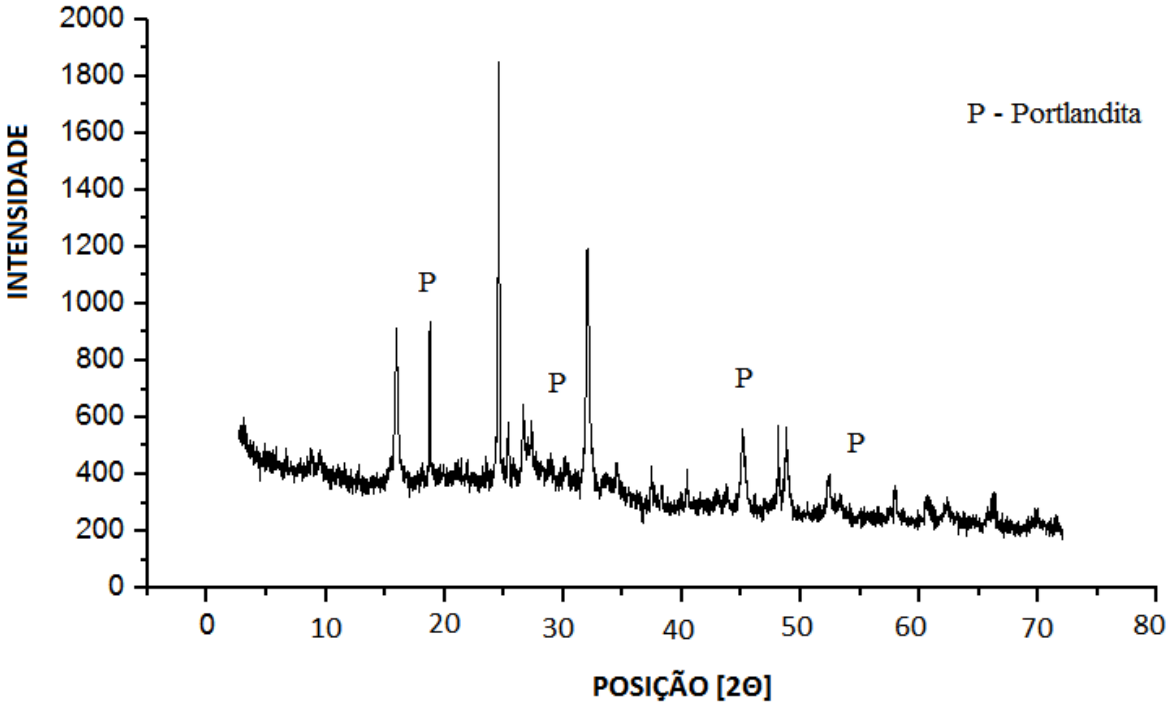
Fonte: O autor (2016).

GRÁFICO 47 – D.R.X Difração de raios-X da CB500 P#400



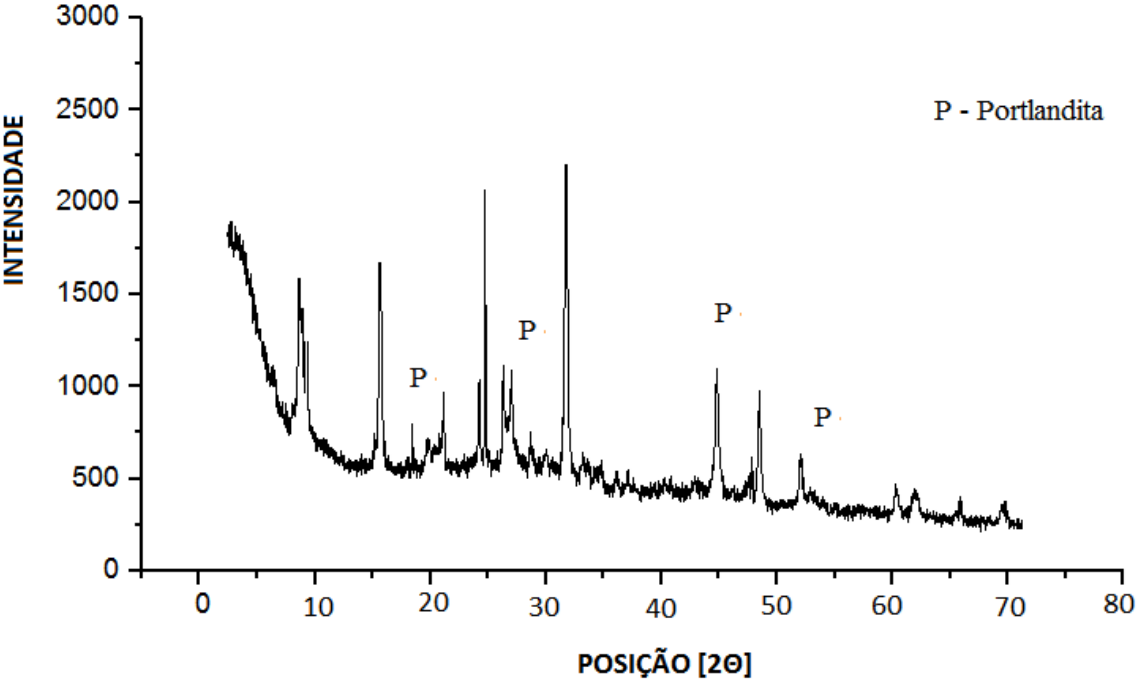
Fonte: O autor (2016).

GRÁFICO 48 – Difração de raios-X da CB500 M7H



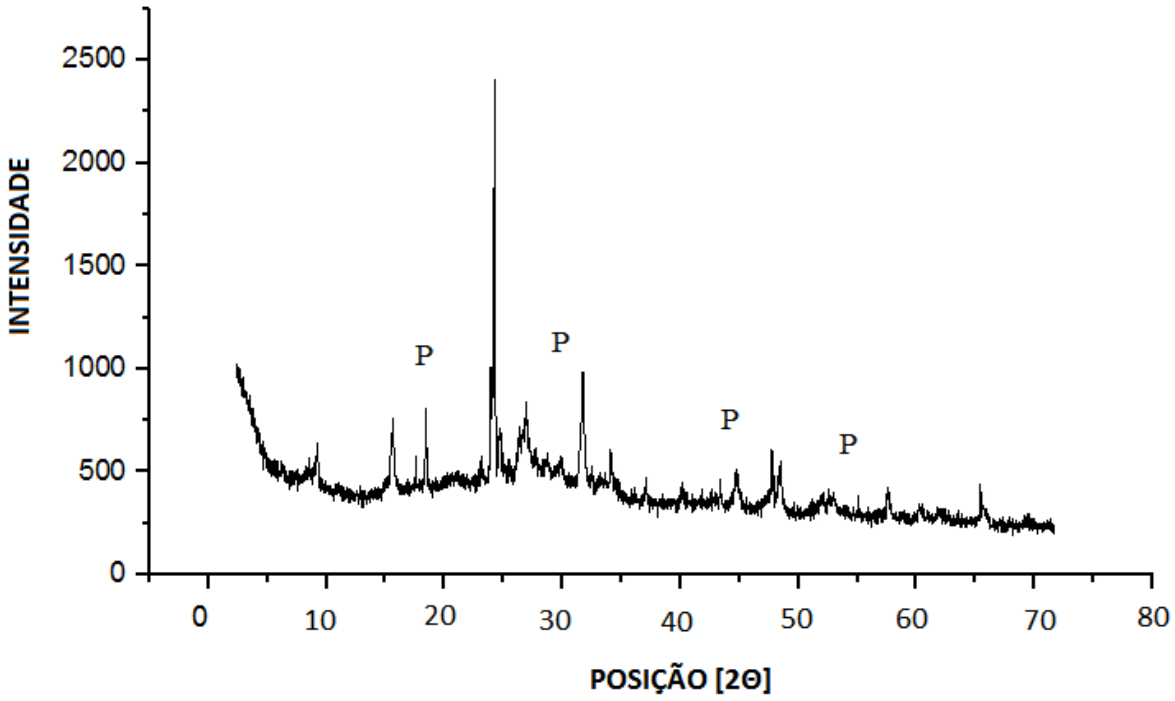
Fonte: O autor (2016).

GRÁFICO 49 – Difração de raios-X da CB600 R#200



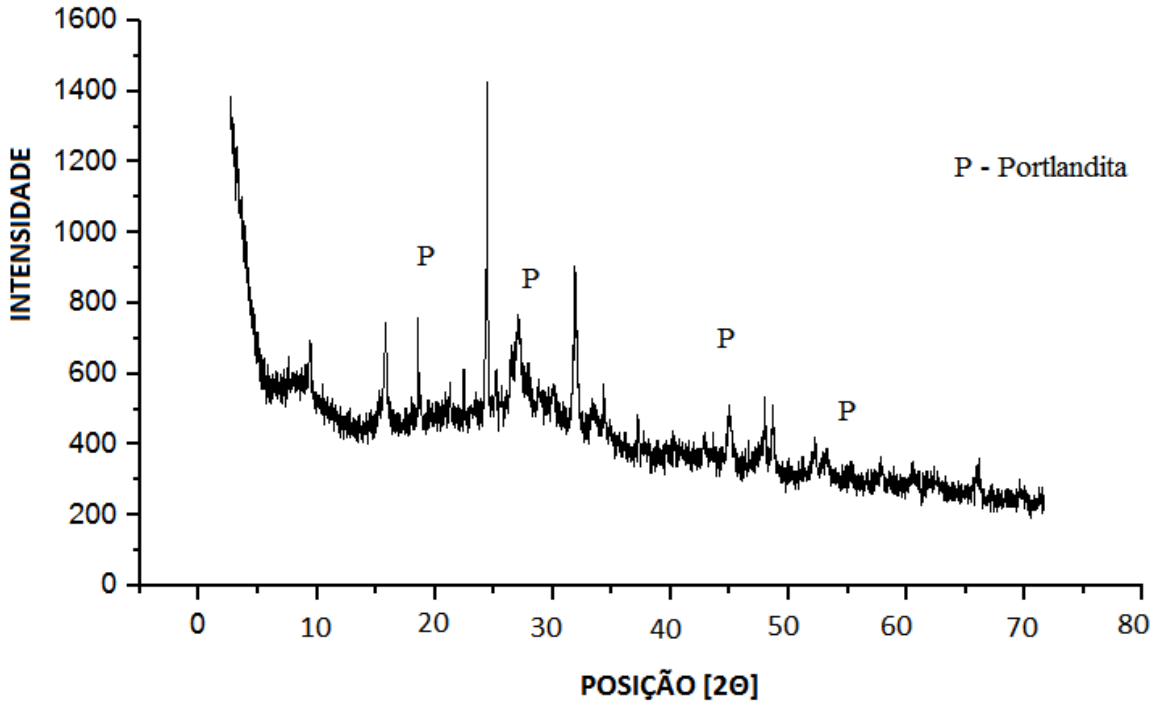
Fonte: O autor (2016).

GRÁFICO 50 – Difração de raios-X da CB600 P#200 R#400



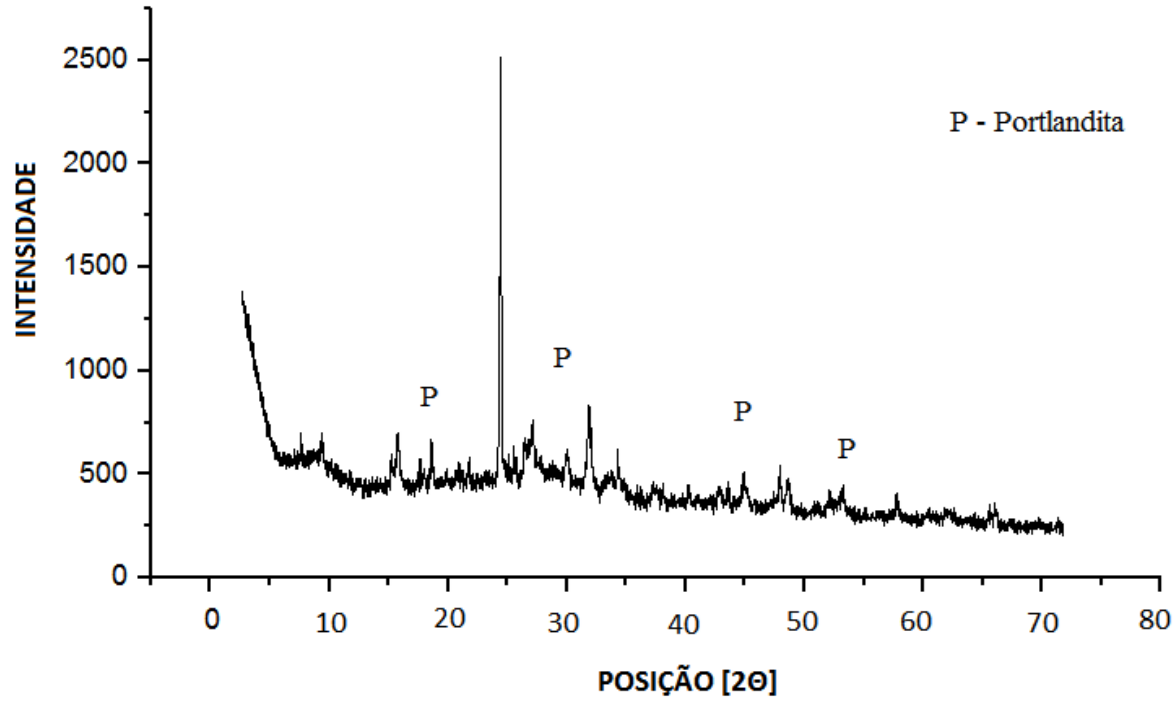
Fonte: O autor (2016).

GRÁFICO 51 – Difração de raios-X da CB600 P#400



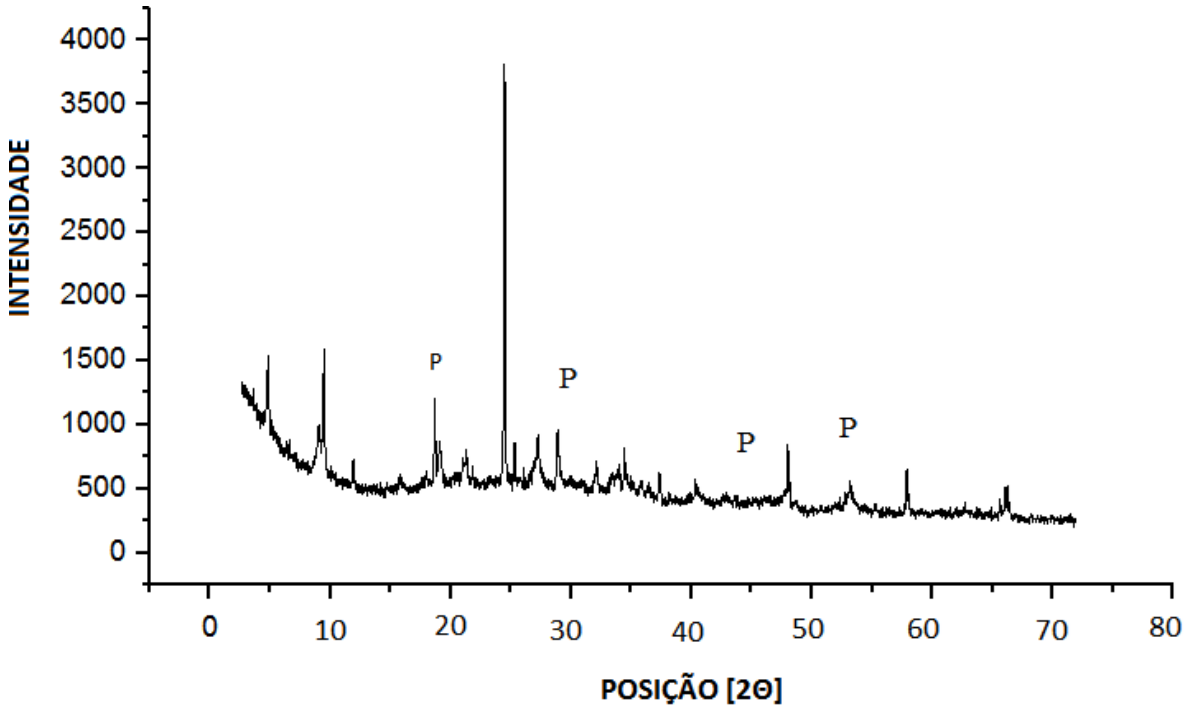
Fonte: O autor (2016).

GRÁFICO 52 – Difração de raios-XdaCB600 M7H



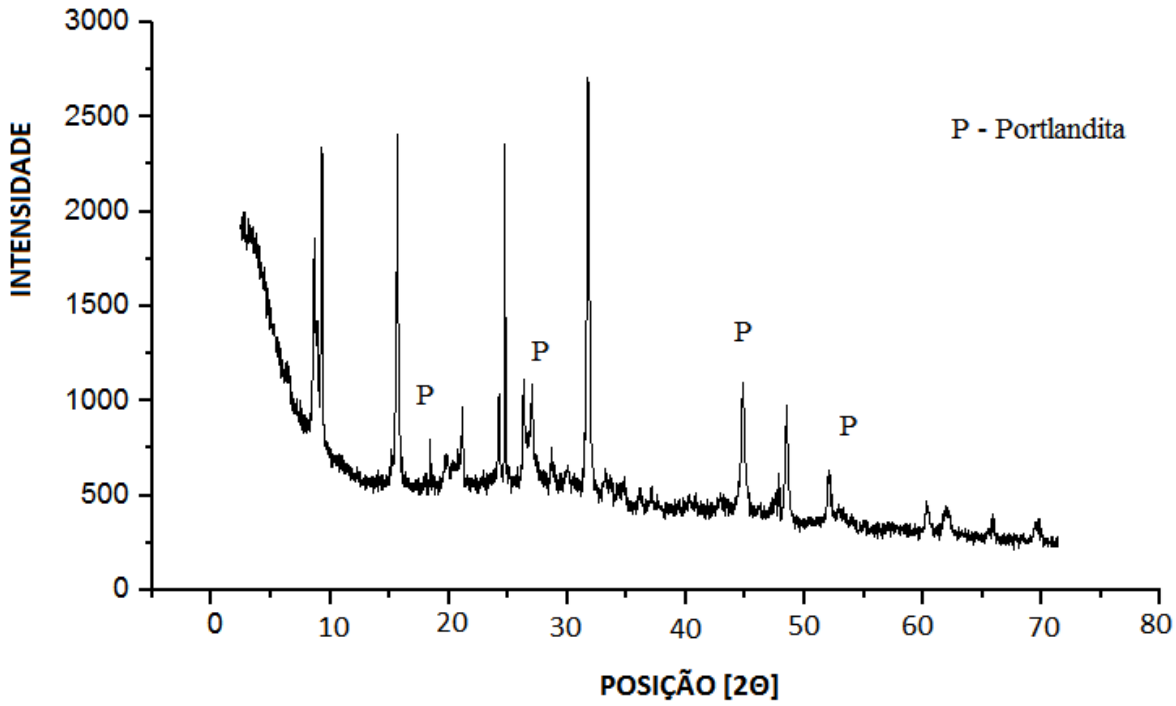
Fonte: O autor (2016).

GRÁFICO 53 – Difração de raios-X da Metacaulim



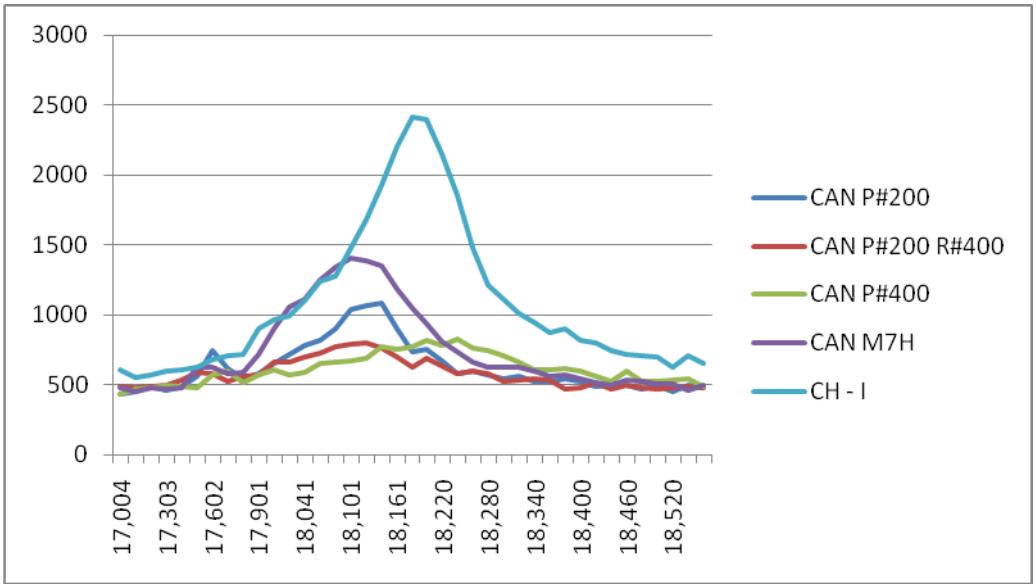
Fonte: O autor (2016).

GRÁFICO 54 – Difração de raios-X da CH- I



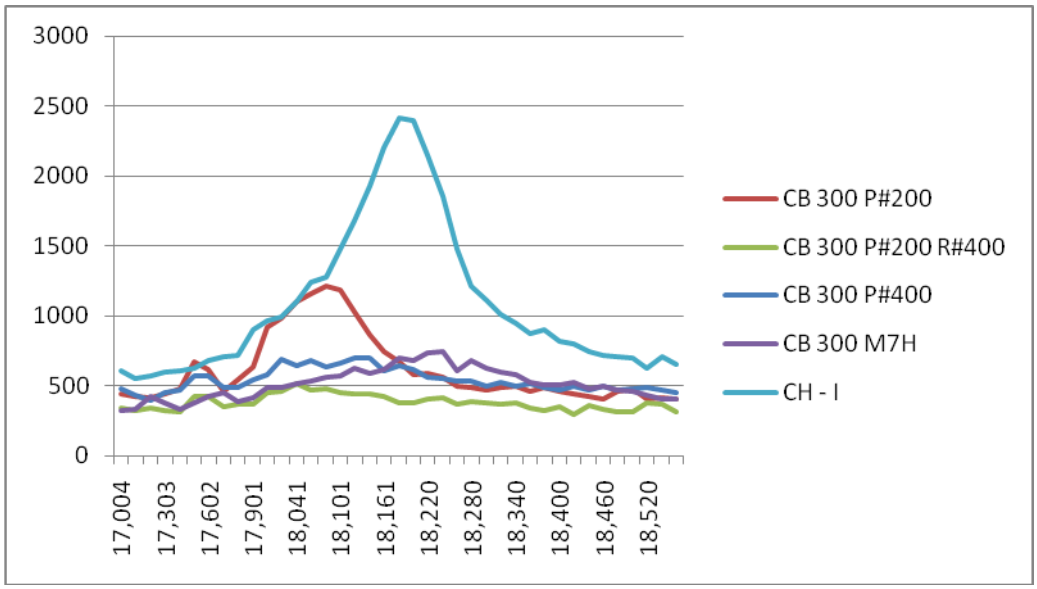
Fonte: O autor (2016).

GRÁFICO 55 – Posição 2Θ = 17° a 18,54° da CAN



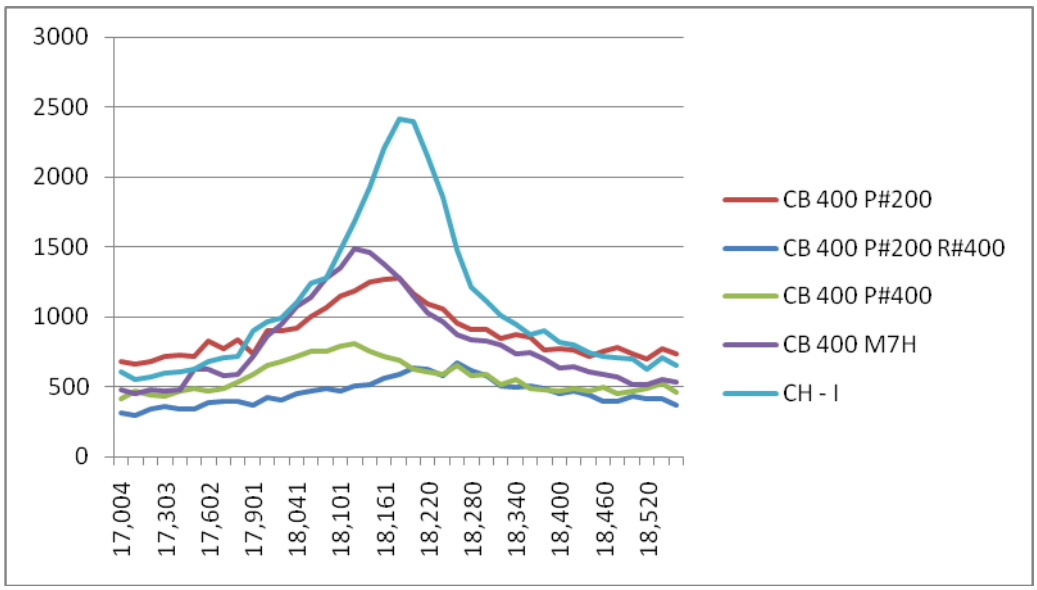
Fonte: O autor (2016).

GRÁFICO 56 – Posição 2Θ = 17° a 18,54° da CB300



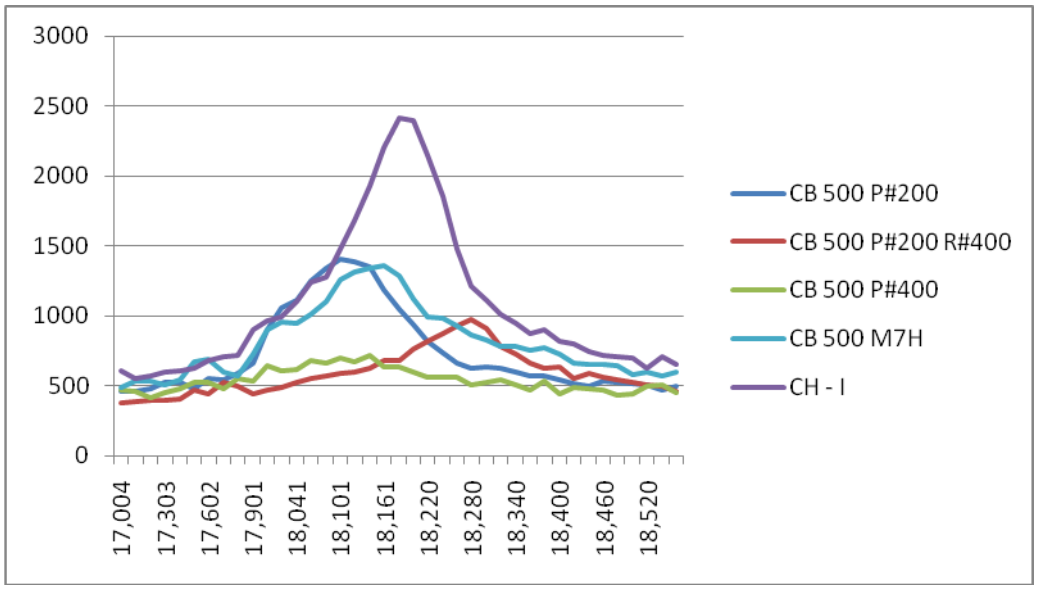
Fonte: O autor (2016).

GRÁFICO 57 – Posição 2Θ = 17° a 18,54° da CB400



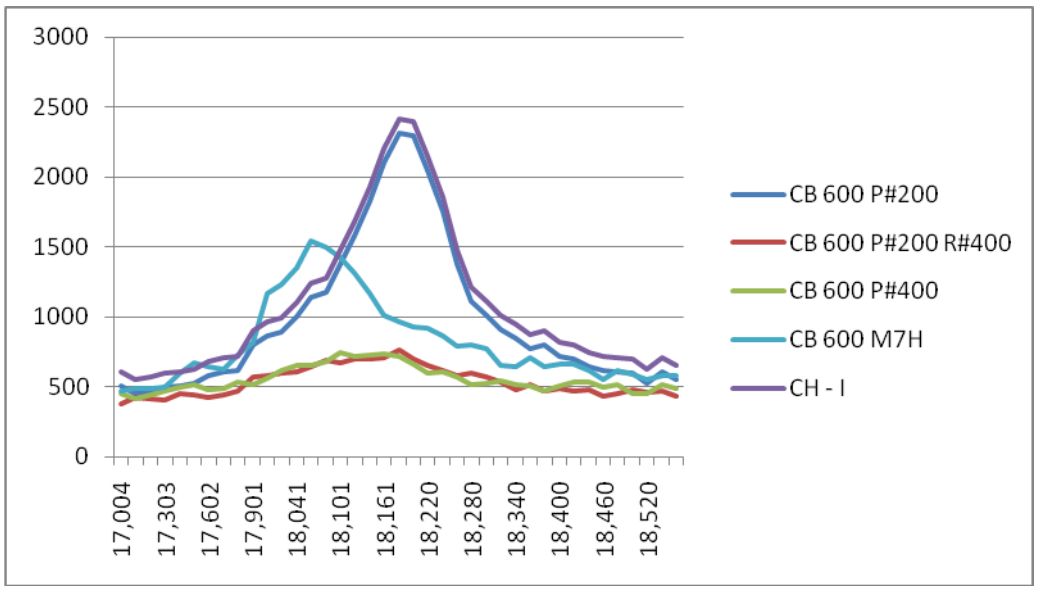
Fonte: O autor (2016).

GRÁFICO 58 – Posição 2Θ = 17° a 18,54° da CB500



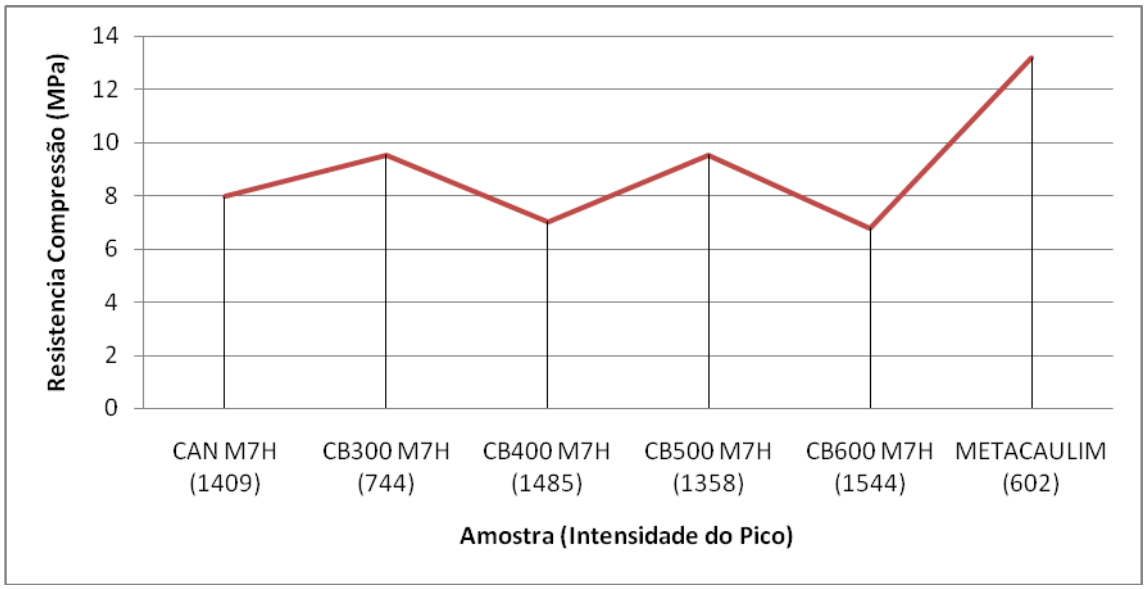
Fonte: O autor (2016).

GRÁFICO 59 – Posição 2Θ = 17° a 18,54° da CB600



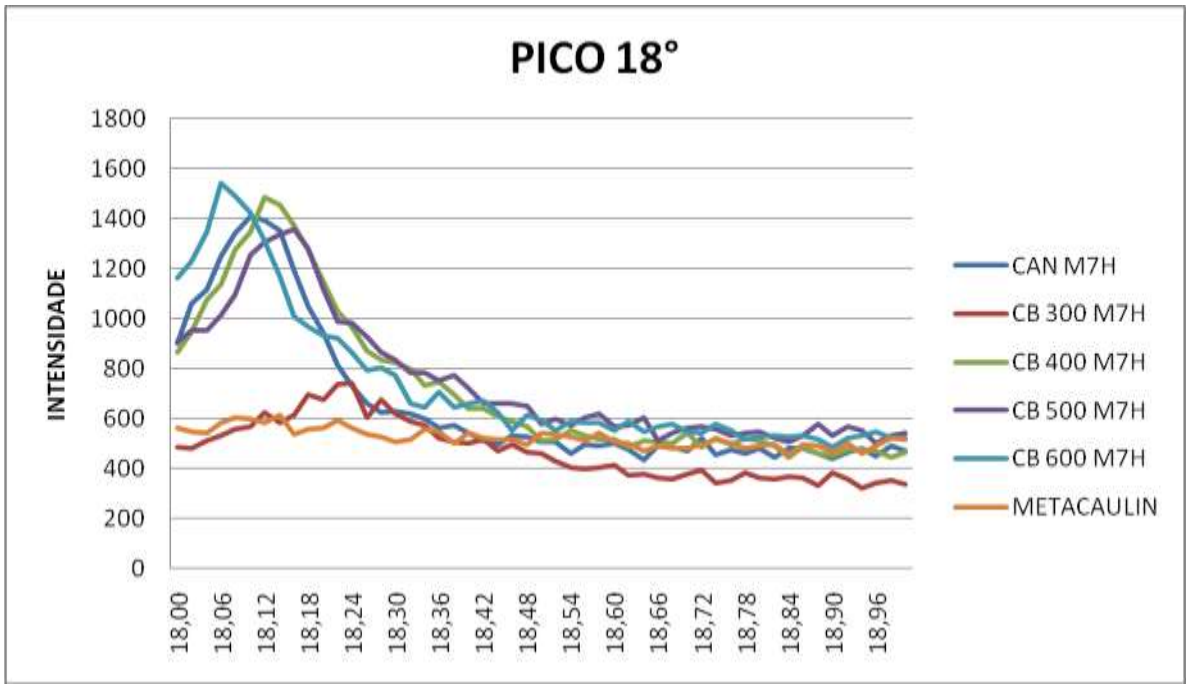
Fonte: O autor (2016).

GRÁFICO 60 – Resistencia Compressão (MPa) x Intensidade do Pico das cinzas M7H



Fonte: O autor (2016).

GRÁFICO 61 – Análise do Pico na posição 2Θ = 18° das cinzas M7H



Fonte: O autor (2016).

Ao analisarmos os picos de 18° na posição [2Ø] 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 esses picos.

Comparando a intensidade do pico da Cal hidratada CH-I que é de cerca de 2400, com a do material pozolânico de referência que apresentou um pico de 600 observa-se uma acentuada queda no mesmo. O metacaulim também obteve um alto valor no ensaio de resistência a compressão, 13,17 MPa, bem como um alto IAC (%) de 221,28.

Como foi observado no ensaio da Associação Brasileira de Normas Técnicas (NBR 5751..., 2012) apenas as cinzas moídas a 7 horas apresentaram resultados próximos desse material e dentro dos valores estabelecidos pela norma. A intensidade dos picos de 18° na posição [2Ø] segue, na maioria dos casos, esse principio, como pode ser observado na Figura 74, as amostras que apresentaram menores consumos de portlandita obtiveram maiores resultados nos ensaio de resistência a compressão para as cinzas moitas por 7 horas indicando uma possível atividade pozolânica no material, embora pela proximidade que a DR-X da CB 300 M7H tem do material de referência era esperado que a mesma apresenta-se um resultado no ensaio de resistência a compressão mais próximo do metacaulim.

Os gráficos mostram que a moagem/peneiramento, com exceção da CB 600, apresentam uma melhora nos resultados a medida que a finura da mesma foi diminuída, desta forma as cinzas moídas a 7 horas tiveram resultados próximos ao obtido pelo material de referencia.

5 CONCLUSÕES

Através dos ensaios de caracterização físicas das amostras analisadas foi possível observar que os tratamentos de peneiramento e moagem utilizados nesta pesquisa permitiram distinguir os efeitos da diminuição do tamanho das partículas, desta forma os mesmos foram bem-sucedidos. A moagem teve papel de destaque no aumento da atividade pozolânica na CBCA, já o tratamento térmico teve um resultado abaixo do esperado pois as temperaturas de calcinação pouco influenciaram nos resultados.

Nos ensaios de caracterização química da CBCA foi possível verificar uma grande presença de material contaminante inerte, possivelmente a areia proveniente do processo de lavagem da cana-de-açúcar, na amostra.Com isso nos ensaios de DRX no pico na posição $2\Theta = 26,64^{o}$o principal material identificado foi o quartzo que provavelmente encobriu a presença de um possível halo amorfo nas análises de DRX.

Em relação ao tratamento de calcinação a DRX mostrou que o aumento de temperaturas provocou um aumento da intensidade (DRX) do pico principal do quartzo cristalino desta forma pode-se dizer que não é aconselhável trabalhar com temperaturas de calcinação acima de 600º C.

Na maioria das amostras de CBCA o índice de atividade pozolânica com cal hidratada (IAC) ficou bem abaixo do valor de 6,0 MPa estabelecido pela norma NBR 5751 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2012), as únicas amostras que apresentaram resultados superiores a eles foram as amostras das cinzas moídas por 7 horas, principalmente a CB300M7H e a CB500M7H que obtiveram um valor de 9,52 Mpa no ensaio de resistência a compressão e o índice de atividade pozolânica com cal hidratada (IAC) de 158,67, mas mesmo assim ambos os resultados ficaram bem abaixo daqueles obtidos pela metacaulim.

O resultado do ensaio de DRX corroborou os resultados obtidos pelos ensaios da Associação Brasileira de Normas Técnicas (NBR 5751..., 2012) a analise dos picos de portlandita na posição $2\Theta = 18^{o}$ indicou uma diminuição na intensidade dos mesmos nas amostras que apresentaram maiores índices de atividade pozolânica.

Com base nos resultados da pesquisa é possível dizer que a CBCA apresenta atividade pozolânica quando submetidas a tratamentos de moagem e calcinação, vale também ressaltar que nas usinas de cana-de-açúcar não costuma existir um controle da temperatura de calcinação bem como um controle das impurezas nas caldeiras das usinas, para que seja possível a sua utilização como como adição para cimento Portland ou de substituição de parte do mesmo seria necessário um maior controle da queima realizadas nas usinas.

Devido a grande diversidade de temperaturas bem como a existência de materiais contaminantes na produção da CBCA, para a obtenção de resultados mais conclusivos se faz necessário a análise de amostras de outras usinas, bem como de tratamentos de moagem e peneiramento que permitam a obtenção de módulos de finura superiores aos apresentados, e que preferencialmente fossem mais próximos daqueles obtidos pelo material de referência o metacaulim, já que esse tipo de tratamento se mostrou benéfico para os resultados.

6 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

a) Estudo em cinzas com módulos de finura superiores daqueles usados nesta pesquisa, já que o mesmo se mostrou eficiente;

b) Estudar cinzas provenientes de outras usinas de cana-de-açúcar e comparar os resultados obtidos afim de avaliar a influencia do processo de geração das cinzas na atividade pozolânica;

c) Realizar a analise das cinzas em misturas ternarias com cal hidratada, metacaulim e CBCA;

d) Realizar os ensaios de resistência a compressão e Índice de atividade com cal em amostras com idades superiores a 28 dias onde os efeitos da atividade pozolânica são maiores;

e) Estudo de concretos e argamassas com a incorporação de CBCA e misturas ternarias com a mesma.

REFERÊNCIAS

ABCP: tipos de cimento brasileiro. [S. l.: s. n.], [20--]. Disponível em: <http://www.abcp.org.br/conteudo/basico-sobre-cimento/tipos/a-versatilidade-do-cimento-brasileiro#.VNZiVfnF-qF>. Acesso em: 5 fev. 2015.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 11579: cimento Portland: determinação da finura por meio da peneira 75 micrômetros (número 200). Rio de Janeiro, 1991.

_____. **NBR 12653**: materiais pozolânicos: especificação. Rio de Janeiro, 1992.

_____. **NBR 15895**: materiais pozolânicos: determinação do teor de hidróxido de cálcio fixado: método Chapelle modificado. Rio de Janeiro, 2010.

_____. **NBR 5751**: materiais pozolânicos: determinação de atividade pozolânica: índice de atividade pozolânica com cal. Rio de Janeiro, 2012.

_____. **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 pozolânico: determinação da pozolanicidade. Rio de Janeiro, 1992.

_____. **NBR 11579**: cimento portland: determinação do índice de finura por meio da peneira 75 μm (nº 200). Rio de Janeiro, 2012.

_____. **NBR NM 23:** cimento portland e outros materiais em pó: determinação de massa específica. Rio de Janeiro, 2001.

_____. **NBR NM 76:** cimento portland: determinação da finura pelo método de permeabilidade ao ar (Método de Blaine). Rio de Janeiro, 1998.

CALDAS, A. et al. O uso de cinzas residuais para produção de novos materiais e componentes construtivos. In: CONGRESSO INTERNACIONAL DE TECNOLOGIA E GESTÃO DA QUALIDADE NA CONSTRUÇÃO CIVIL, 2., 2000, Recife. **Anais...** Recife: [s. n.], 2000.

CASTRO, J. N. T. D. **Influência da cinza do bagaço de cana em concretos**. **,** [S. l.], Ibracon. 2012

CORDEIRO, G. C. **Utilização de cinzas ultrafinas do bagaço de cana-de-açúcar e da casca de arroz como aditivos minerais em concreto.** 2006. 445 f. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) - COPPE, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2006.

CORDEIRO, G. C.; TOLEDO FILHO, R. D. T.; FAIRBAIRN, E. D. M. R. Caracterização de cinza do bagaço de cana-de-açúcar para emprego como pozolana em materiais cimentícios. **Quim. Nova**, [s. l.], v. 32, p. 82-86, 2009.

CORDEIRO, L. N. **Análise da variação do índice de amorficidade da cinza da casca do arroz sobre a atividade pozolânica**. 2009. 98 f. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2009.

FARIAS, E. C. D. **Estudo comparativo da utilização de cinza da biomassa de cana-de açúcar e de metacaulim em concretos autoadensáveis. ,** [S. l.], Ibracon, 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 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Centro de Ciência e Tecnologia, Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro, Rio de Janeiro, 2005.

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

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

ISAIA, G. C. **Concreto:** ciência e tecnologia. São Paulo: Ibracon, 2011. v. 1-2

LIMA, S. A. Concretos com cinza do bagaço da cana-de-açúcar: avaliação da durabilidade por meio de ensaios de carbonatação e abrasão. **Ambiente Construído,** Porto Alegre, v. 11, p. 201-212, 2011.

LIMBACHIYA, M. C. Bulk engineering and durability properties of washed glass sand concrete. **Construction and Building Materials,** [S. l.], v. 23, n. 2, p. 1078-1083, fev., 2009.

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

MACEDO, P. C. **Avaliação do desempenho de argamassas com adição de cinza do bagaço de cana-de-açúcar**. 2009. 116 f Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Faculdade de Engenharia, Universidade Estadual Paulista, Ilha Solteira, 2009.

MEHTA, P. K.; MONTEIRO, P. J. M. **Concreto:** estrutura, propriedades e materiais. 1. ed. São Paulo : Pini, 2000.

PAULA, M. O. **Potencial da cinza do bagaço de cana-de-açúcar como material de substituição parcial de cimento portland**. 2006. 60 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola) - Universidade Federal de Viçosa, 2006.

PONTES, J. M. P. N. **Reatividade de pozolanas para argamassas e concretos.** 2011. 90 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Faculdade de Ciência e Tecnologia, Universidade Nova de Lisboa. Lisboa, 2011.

RODRIGUES, M. S. **Avaliação de cinzas de palha de cana-de-açúcar e sua utilização como adição mineral em matrizes cimentícias**. 2011. 174 f. Tese (Doutorado em Engenharia Agrícola) – Faculdade de Engenharia Agrícola, Universidade Estadual de Campinas, Campina, 2012.

SALES, A.; LIMA, S. A. **Use of brazilian sugarcane bagasse ash in concrete as sand replacement.** [S. l.]: Waste Management. 2010.

SOUZA, P. S. L.; DAL MOLIN, D. C. C. Viabilityofusingcalcinedclays, from industrial by-products, as pozzolansof high reactivity**. Cementand concrete research,** [S. l.]:, vol. 35, n. 10, p. 1993-1998, 2005.

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

VASCONCELOS, M. C. A. **Avaliação da atividade pozolânica da cinza do bagaço de cana-de-açúcar utilizando métodos físicos**. 2013. 133 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Centro de Tecnologia e Geociências, Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2013.

WANG, H. - Y.; HUANG, W. - L. Durabilityof self-consolidating concrete usingwaste LCD glass. **Construction and Building Materials,** [S. l.], v. 24, n. 6, p. 1008-1013, jun. 2010.