



**UNIVERSIDADE FEDERAL DE PERNAMBUCO
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL**

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO

**AVALIAÇÃO DA ATIVIDADE POZOLÂNICA DA CINZA DO
BAGAÇO DE CANA-DE-AÇÚCAR UTILIZANDO MÉTODOS FÍSICOS**

MARCELA CORREIA DE ARAÚJO VASCONCELOS

RECIFE

2013

MARCELA CORREIA DE ARAÚJO VASCONCELOS

**AVALIAÇÃO DA ATIVIDADE POZOLÂNICA DA CINZA DO
BAGAÇO DE CANA-DE-AÇÚCAR UTILIZANDO MÉTODOS FÍSICOS**

**Dissertação apresentada à banca examinadora
do Centro de Tecnologia e Geociências da
Universidade Federal de Pernambuco para
obtenção de Título de Mestre em Engenharia.**

Área de Concentração: Estruturas

**Orientador:
Prof. Arnaldo Manoel Pereira Carneiro**

**Coorientador:
Prof. Antônio Acácio de Melo Neto**

RECIFE

2013

Catálogo na fonte
Bibliotecária: Rosineide Mesquita Gonçalves Luz / CRB4-1361 (BCTG)

V331a Vasconcelos, Marcela Correia de Araújo.
Avaliação da atividade pozolânica da cinza do bagaço de Cana-de-açúcar utilizando métodos físicos / Marcela Correia de Araújo Vasconcelos. – Recife: O Autor, 2013.
33f., il., figs., gráfs., tabs.

Orientador: Prof. Dr. Arnaldo Manoel Pereira Carneiro.
Coorientador: Prof. Dr. Antônio Acácio de Melo Neto.
Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Pernambuco. CTG.
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, 2013.
Inclui Referências e Apêndice.

1. Engenharia Civil. 2. Concreto. 3. Adição Pozolânica. 4. Cinza de Bagaço de Cana-de-açúcar. I. Carneiro, Arnaldo Manoel Pereira (Orientador). II. Melo Neto, Antônio Acácio de (Coorientador). III. Título.

624 CDD (22.ed) UFPE/BCTG-2014/ 260

MARCELA CORREIA DE ARAÚJO VASCONCELOS

**AVALIAÇÃO DA ATIVIDADE POZOLÂNICA DA CINZA DO
BAGAÇO DE CANA-DE-AÇÚCAR UTILIZANDO MÉTODOS FÍSICOS**

**Dissertação apresentada à Comissão
Examinadora do Centro de Tecnologia e
Geociências da Universidade Federal de
Pernambuco.**

Considera a candidata APROVADA.

Orientadores:

**Prof. Dr. Arnaldo Manoel Pereira Carneiro – UFPE
(orientador)**

**Prof. Dr. Antônio Acácio de Melo Neto – UFPE
(coorientador)**

Banca Examinadora:

**Prof. Dr. Arnaldo Manoel Pereira Carneiro – UFPE
(orientador)**

**Prof.^a Dr.^a Karoline Alves de Melo Moraes - UFAL
(examinadora externa)**

**Prof. Dr. Humberto Correia Lima Junior – UFPE
(examinador externo)**

Recife, 30 de Agosto de 2013

*Dedico esse trabalho a Deus e a todos os arquitetos e engenheiros que trabalham para a
construção de um mundo mais sustentável.*

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus que me deu a oportunidade de realização este trabalho.

Aos meus amigos e familiares que incentivaram e deram ânimo.

A Marcelo Paes Barreto, pelo apoio incentivo e paciência.

Aos bolsistas de iniciação científica Thiago Araújo e Jofre Lima cuja ajuda foi fundamental para a realização de grande parte dos ensaios de laboratório.

A CAPES por dar apoio financeiro a esse trabalho.

Em especial ao coorientador Prof. Antônio Acácio de Melo Neto e ao orientador Prof. Arnaldo Manoel Pereira Carneiro que forneceram todo conhecimento e subsídio necessário para o desenvolvimento e conclusão desta pesquisa.

Por fim, a todos que de forma direta ou indireta contribuíram para a realização deste trabalho.

RESUMO

Existem resíduos de processos industriais que são característicos do estado de Pernambuco, como o bagaço de cana-de-açúcar, e que são poucos abordados por estudos sistemáticos para o seu emprego na construção civil. O estudo consiste em comparar a atividade pozolânica da cinza do bagaço de cana-de-açúcar (CBCA) e de um material comprovadamente pozolânico fazendo uso dos ensaios tradicionais de determinação de atividade pozolânica. Existem diversos métodos considerados tradicionais, geralmente divididos nos que mensuram um parâmetro de resistência mecânica (definidos como “métodos físicos”) e nos que mensuram de forma direta ou indireta a reação química que caracteriza a existência da atividade pozolânica (definidos como “métodos químicos”). A abordagem desta questão será utilizar métodos físicos previstos por normas brasileiras e métodos físicos modificados para a determinação da atividade pozolânica. No intuito de apontar caminhos para a utilização deste resíduo na construção civil, o presente trabalho apresenta os resultados da análise de 29 amostras de cinza que receberam diferentes tratamentos térmicos e físicos e mais a análise do metacaulim que foi utilizado como material pozolânico de referência. Todas as amostras foram caracterizadas por difração de raios-X e passaram pelos ensaios mecânicos previstos nas normas NBR 5751:1992 e NBR 5752:1992 para determinação do índice de atividade pozolânica. De acordo com os resultados obtidos, evidenciou-se que os métodos normatizados não apresentam respostas totalmente congruentes, pois, a atividade pozolânica foi constatada pelo método de atividade com cimento Portland (IAP), porém não foi constatada pelo método de atividade com cal hidratada. A CBCA “in natura” apresentou IAP superior ao estabelecido pela NBR 12653:1992 (75%) quando do aumento do grau de moagem, assim como a CBCA calcinada a 600°C. A moagem mostrou ser de fundamental importância para o aumento do potencial pozolânico da CBCA, concluindo-se que finura Blaine deve ser superior a 500 m²/kg. A temperatura de calcinação se mostrou relevante quando aplicação de 600°C, acima deste valor ocorreu o decréscimo dos índices de pozolanicidade.

Palavras chaves: Concreto. Adição Pozolânica. Cinza de Bagaço de Cana-de-açúcar.

ABSTRACT

There are residues of industrial processes that are characteristic of the state of Pernambuco, as bagasse from sugar, and few addressed by systematic studies for your construction jobs. The study is to compare the pozzolanic activity of bagasse ash from sugar cane (CBCA) and a pozzolanic material shown making use of traditional tests to determine pozzolanic activity. Several methods are considered traditional, generally divided in that measure a parameter of mechanical resistance (defined as "physical methods") and in that measure directly or indirectly the chemical reaction that characterizes the existence of pozzolanic activity (defined as "chemical methods"). The approach to this issue is to use physical methods provided by modified for the determination of pozzolanicity Brazilian standards and physical methods. In order to point out ways to use this waste in construction, this paper presents the results of analysis of 29 samples of gray that received different thermal and physical treatments and more analysis that metakaolinpozzolanic material was used as reference. All samples were characterized by X-ray diffraction and passed by the expected in NBR 5751:1992 and NBR 5752:1992 standards for determining the pozzolanic activity index mechanical tests. According to the results, it was evident that standardized methods have not fully congruent answers, because the pozzolanic activity was observed by the method of activity with Portland (IAP) cement, but was not detected by the method of activity with hydrated lime. The CBCA "in natura" made higher than in the NBR 12653:1992 (75%) while increasing the fineness of grind, and calcined at 600°C CBCA IAP. The grinding proved to be of fundamental importance to increase the potential of pozzolanic CBCA, concluding that Blaine fineness must be greater than 500 m² / kg. The calcination temperature was also relevant when applying 600°C, above this value was decreasing rates of pozzolanicity.

Key words: Concrete. Pozzolanic Addition. Bagasse ash sugar cane.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1 - Produção de cana-de-açúcar entre 2004 e 2012 no Brasil e em Pernambuco.....	16
Figura 2.1 - Evolução da produção de cimento em comparação com o clínquer e as adições	20
Figura 2.2 - Evolução no uso de adições ao cimento em substituição ao clínquer	
Figura 2.3 - Gráfico da esquerda: Efeito da idade de cura no teor de hidróxido de cálcio de uma argamassa de cimento e areia preparada com cimento Portland pozolânico. Gráfico da direita: Comparativo da resistência com cimentos com diferentes proporções de pozolana.....	24
Figura 2.4 - Esquema gráfico que representa a micro estrutura de uma pasta de cimento hidratada com e sem adição pozolânica.....	25
Figura 2.5 - Mudanças na distribuição de tamanho dos poros de pasta de cimento com teores variáveis de pozolana.....	26
Figura 2.6 - Esquema gráfico que representa a zona de transição entre agregado graúdo e a pasta de cimento hidratada. A esquerda cimento sem adição pozolânica, a direita cimento com adição.....	27
Figura 2.7 - Processo de geração das cinzas.....	31
Figura 2.8 - Morfologia das partículas da cinza do bagaço de cana de açúcar	
Figura 3.1 - Bagaço da cana-de-açúcar antes do processo de queima.....	39
Figura 3.2 - Caldeira – Processo de queima do bagaço da cana-de-açúcar.....	39
Figura 3.3 - Esquema do tratamento da CBCA – Tratamento térmico. Onde L = resfriamento lento (temperatura ambiente) e R = resfriamento rápido (brusca imersão em água em temperatura ambiente).	42
Figura 3.4 – Sequência geral do preparo da CBCA	43
Figura 3.5 - Esquema do tratamento da CBCA “in natura” (CAN) – Tratamento físico – Moagem.....	45
Figura 3.6 - Esquema do tratamento da CBCA calcinada a 600, 700 e 800°C – Tratamento físico - Moagem.....	46
Figura 3.7 - Esquema das determinações para a caracterização básica das amostras	47
Figura 4.1 – Área específica (Blaine) da CBCA “in natura” e calcinada (600, 700 e 800°C), resfriada lentamente e submetida aos graus de moagem de 300±20, 400±20 e 500±20 m ² /kg.....	52
Figura 4.2 – Área específica (Blaine) da CBCA “in natura” e calcinada (600, 700 e 800°C), resfriada rapidamente e submetida aos graus de moagem de 300±20, 400±20 e 500±20 m ² /kg.....	52
Figura 4.3 – Massa específica da CBCA “in natura” e calcinada (600, 700 e 800°C), resfriada lentamente e submetida aos graus de moagem de 300±20, 400±20 e 500±20 m ² /kg	53
Figura 4.4 – Massa específica da CBCA “in natura” e calcinada (600, 700 e 800°C), resfriada rapidamente e submetida aos graus de moagem de 300±20, 400±20 e 500±20 m ² /kg	53
Figura 4.5 – Difração de raios X da CBCA “in natura” e submetida aos graus de moagem de 300±20, 400±20 e 500±20 m ² /kg.....	54
Figura 4.6 – Difração de raios X da CBCA calcinada à 600°C, resfriada lentamente e com os graus de moagem de 300±20, 400±20 e 500±20 m ² /kg.....	54
Figura 4.7 – Difração de raios X da CBCA calcinada à 700°C, resfriada lentamente e com os graus de moagem de 300±20, 400±20 e 500±20 m ² /kg.....	55

Figura 4.8 – Difração de raios X da CBCA calcinada à 800°C, resfriada lentamente e com os graus de moagem de 300±20, 400±20 e 500±20 m2/kg.....	55
Figura 4.9 – Gráfico comparativo das intensidades (DRX) dos picos principais do quartzo presente na CBCA “in natura” e submetida aos graus de moagem de 300±20, 400±20 e 500±20 m2/kg. Resfriamento lento.	56
Figura 4.10 – Difração de raios X da CBCA calcinada à 600°C, resfriada rapidamente e com os graus de moagem de 300±20, 400±20 e 500±20 m2/kg	57
Figura 4.11 – Difração de raios X da CBCA calcinada à 700°C, resfriada rapidamente e com os graus de moagem de 300±20, 400±20 e 500±20 m2/kg	57
Figura 4.12 – Difração de raios X da CBCA calcinada à 800°C, resfriada rapidamente e com os graus de moagem de 300±20, 400±20 e 500±20 m2/kg	58
Figura 4.13 – Gráfico comparativo das intensidades (DRX) dos picos principais do quartzo presente na CBCA submetida aos graus de moagem de 300±20, 400±20 e 500±20 m2/kg. Resfriamento rápido.	58
Figura 4.14 – Efeito da temperatura de calcinação e do tipo de resfriamento na intensidade (DRX) do pico principal do quartzo ($2\theta = 26,64^\circ$). Média de todas as amostras	59
Figura 4.15 – Índice de atividade pozolânica (IAP) com cimento Portland da CBCA versus a relação água/aglomerante. Todas as amostras. Calcinação seguida de resfriamento lento	62
Figura 4.16 – Índice de atividade pozolânica (IAP) com cimento Portland da CBCA versus a relação água/aglomerante. Todas as amostras. Calcinação seguida de resfriamento rápido... ..	62
Figura 4.17 – Água requerida versus a finura Blaine. Todas as amostras. Calcinação seguida de resfriamento lento	63
Figura 4.18 – Água requerida versus a finura Blaine. Todas as amostras. Calcinação seguida de resfriamento rápido	63
Figura 4.19 – Índice de atividade pozolânica (IAP) com cimento Portland da CBCA “in natura” e submetida aos graus de moagem de 300±20, 400±20 e 500±20 m2/kg	64
Figura 4.20 – Índice de atividade pozolânica (IAP) com cimento Portland da CBCA calcinada à 600°C, resfriada lentamente e com os graus de moagem de 300±20, 400±20 e 500±20 m2/kg.....	65
Figura 4.21 – Índice de atividade pozolânica (IAP) com cimento Portland da CBCA calcinada à 700°C, resfriada lentamente e com os graus de moagem de 300±20, 400±20 e 500±20 m2/kg.....	65
Figura 4.22 – Índice de atividade pozolânica (IAP) com cimento Portland da CBCA calcinada à 800°C, resfriada lentamente e com os graus de moagem de 300±20, 400±20 e 500±20 m2/kg.....	66
Figura 4.23 – Índice de atividade pozolânica (IAP) com cimento Portland da CBCA versus a finura Blaine. Todas as amostras. Calcinação seguida de resfriamento lento.	67
Figura 4.24 – Índice de atividade pozolânica (IAP) com cimento Portland da CBCA “in natura” e calcinada nas temperaturas de 600, 700 e 800°C com resfriamento lento. Sem moagem	67
Figura 4.25 – Índice de atividade pozolânica (IAP) com cimento Portland da CBCA “in natura” e calcinada nas temperaturas de 600, 700 e 800°C com resfriamento lento. Grau de moagem de 300±20 m2/kg	68
Figura 4.26 – Índice de atividade pozolânica (IAP) com cimento Portland da CBCA “in natura” e calcinada nas temperaturas de 600, 700 e 800°C com resfriamento lento. Grau de moagem de 400±20 m2/kg	68
Figura 4.27 – Índice de atividade pozolânica (IAP) com cimento Portland da CBCA “in natura” e calcinada nas temperaturas de 600, 700 e 800°C com resfriamento lento. Grau de moagem de 500±20 m2/kg	69

Figura 4.28 – Índice de atividade pozolânica (IAP) com cimento Portland da CBCA versus a temperatura de calcinação. Todas as amostras. Calcinação seguida de resfriamento lento.	69
Figura 4.29 – Índice de atividade pozolânica (IAP) com cimento Portland da CBCA calcinada à 600°C, resfriada rapidamente e com os graus de moagem de 300±20, 400±20 e 500±20 m2/kg.....	70
Figura 4.30 – Índice de atividade pozolânica (IAP) com cimento Portland da CBCA calcinada à 700°C, resfriada rapidamente e com os graus de moagem de 300±20, 400±20 e 500±20 m2/kg.....	71
Figura 4.31 – Índice de atividade pozolânica (IAP) com cimento Portland da CBCA calcinada à 800°C, resfriada rapidamente e com os graus de moagem de 300±20, 400±20 e 500±20 m2/kg.....	71
Figura 4.32 – Índice de atividade pozolânica (IAP) com cimento Portland da CBCA versus a finura Blaine. Todas as amostras. Calcinação seguida de resfriamento rápido.....	72
Figura 4.33 – Índice de atividade pozolânica (IAP) com cimento Portland da CBCA “in natura” e calcinada nas temperaturas de 600, 700 e 800°C com resfriamento rápido. Sem moagem	73
Figura 4.34 – Índice de atividade pozolânica (IAP) com cimento Portland da CBCA “in natura” e calcinada nas temperaturas de 600, 700 e 800°C com resfriamento rápido. Grau de moagem de 300±20 m2/kg	73
Figura 4.35 – Índice de atividade pozolânica (IAP) com cimento Portland da CBCA “in natura” e calcinada nas temperaturas de 600, 700 e 800°C com resfriamento rápido. Grau de moagem de 400±20 m2/kg	74
Figura 4.36 – Índice de atividade pozolânica (IAP) com cimento Portland da CBCA “in natura” e calcinada nas temperaturas de 600, 700 e 800°C com resfriamento rápido. Grau de moagem de 500±20 m2/kg	74
Figura 4.37 – Índice de atividade pozolânica (IAP) com cimento Portland da CBCA versus a temperatura de calcinação. Todas as amostras. Calcinação seguida de resfriamento rápido...	75
Figura 4.38 – Índice de atividade pozolânica (IAP) com cimento Portland da CBCA “in natura” e com os graus de moagem de 300±20, 400±20 e 500±20 m2/kg. ABNT NBR 5752:1992 Modificada.....	78
Figura 4.39 – Índice de atividade pozolânica (IAP) com cimento Portland da CBCA calcinada à 600°C, resfriada lentamente e com os graus de moagem de 300±20, 400±20 e 500±20 m2/kg. ABNT NBR 5752:1992 Modificada	78
Figura 4.40 – Índice de atividade pozolânica (IAP) com cimento Portland da CBCA calcinada à 700°C, resfriada lentamente e com os graus de moagem de 300±20, 400±20 e 500±20 m2/kg. ABNT NBR 5752:1992 Modificada	79
Figura 4.41 – Índice de atividade pozolânica (IAP) com cimento Portland da CBCA calcinada à 800°C, resfriada lentamente e com os graus de moagem de 300±20, 400±20 e 500±20 m2/kg. ABNT NBR 5752:1992 Modificada	79
Figura 4.42 – Índice de atividade pozolânica (IAP) com cimento Portland da CBCA versus a finura Blaine. Todas as amostras. ABNT NBR 5752:1992 Modificada. Calcinação seguida de resfriamento lento	80
Figura 4.43 – Índice de atividade pozolânica (IAP) com cimento Portland da CBCA “in natura” e calcinada nas temperaturas de 600, 700 e 800°C com resfriamento lento. Sem moagem. ABNT NBR 5752:1992 Modificada.....	81
Figura 4.44 – Índice de atividade pozolânica (IAP) com cimento Portland da CBCA “in natura” e calcinada nas temperaturas de 600, 700 e 800°C com resfriamento lento. Grau de moagem de 300±20 m2/kg. ABNT NBR 5752:1992 Modificada.....	81
Figura 4.45 – Índice de atividade pozolânica (IAP) com cimento Portland da CBCA “in natura” e calcinada nas temperaturas de 600, 700 e 800°C com resfriamento lento. Grau de	

oagem de 400±20 m ² /kg. ABNT NBR 5752:1992 Modificada.....	82
Figura 4.46 – Índice de atividade pozolânica (IAP) com cimento Portland da CBCA “in natura” e calcinada nas temperaturas de 600, 700 e 800°C com resfriamento lento. Grau de moagem de 500±20 m ² /kg. ABNT NBR 5752:1992 Modificada.....	82
Figura 4.47 – Índice de atividade pozolânica (IAP) com cimento Portland da CBCA versus a temperatura de calcinação. Todas as amostras. ABNT NBR 5752:1992 Modificada. Calcinação seguida de resfriamento lento.	83
Figura 4.48 – Índice de atividade pozolânica (IAP) com cimento Portland da CBCA calcinada à 600°C, resfriada rapidamente e com os graus de moagem de 300±20, 400±20 e 500±20 m ² /kg. ABNT NBR 5752:1992 Modificada	84
Figura 4.49 – Índice de atividade pozolânica (IAP) com cimento Portland da CBCA calcinada à 700°C, resfriada rapidamente e com os graus de moagem de 300±20, 400±20 e 500±20 m ² /kg. ABNT NBR 5752:1992 Modificada	84
Figura 4.50 – Índice de atividade pozolânica (IAP) com cimento Portland da CBCA calcinada à 800°C, resfriada rapidamente e com os graus de moagem de 300±20, 400±20 e 500±20 m ² /kg. ABNT NBR 5752:1992 Modificada	85
Figura 4.51 – Índice de atividade pozolânica (IAP) com cimento Portland da CBCA versus a finura Blaine. Todas as amostras. ABNT NBR 5752:1992 Modificada. Calcinação seguida de resfriamento rápido.....	85
Figura 4.52 – Índice de atividade pozolânica (IAP) com cimento Portland da CBCA “in natura” e calcinadas nas temperaturas de 600, 700 e 800°C com resfriamento rápido. Sem moagem. ABNT NBR 5752:1992 Modificada.....	86
Figura 4.53 – Índice de atividade pozolânica (IAP) com cimento Portland da CBCA “in natura” e calcinadas nas temperaturas de 600, 700 e 800°C com resfriamento rápido. Grau de moagem de 300±20 m ² /kg. ABNT NBR 5752:1992 Modificada.....	86
Figura 4.54 – Índice de atividade pozolânica (IAP) com cimento Portland da CBCA “in natura” e calcinadas nas temperaturas de 600, 700 e 800°C com resfriamento rápido. Grau de moagem de 400±20 m ² /kg. ABNT NBR 5752:1992 Modificada.....	87
Figura 4.55 – Índice de atividade pozolânica (IAP) com cimento Portland da CBCA “in natura” e calcinadas nas temperaturas de 600, 700 e 800°C com resfriamento rápido. Grau de moagem de 500±20 m ² /kg. ABNT NBR 5752:1992 Modificada.....	87
Figura 4.56 – Índice de atividade pozolânica (IAP) com cimento Portland da CBCA versus a temperatura de calcinação. Todas as amostras. ABNT NBR 5752:1992 Modificada. Calcinação seguida de resfriamento rápido	88
Figura 4.57 – Resistência à compressão (ABNT NBR 5751:1992) da CBCA “in natura” e submetida aos graus de moagem de 300±20, 400±20 e 500±20 m ² /kg.....	90
Figura 4.58 – Resistência à compressão (ABNT NBR 5751:1992) da CBCA calcinada à 600°C, resfriada lentamente e com os graus de moagem de 300±20, 400±20 e 500±20 m ² /kg.....	91
Figura 4.59 – Resistência à compressão (ABNT NBR 5751:1992) da CBCA calcinada à 700°C, resfriada lentamente e com os graus de moagem de 300±20, 400±20 e 500±20 m ² /kg.....	91
Figura 4.60 – Resistência à compressão (ABNT NBR 5751:1992) da CBCA calcinada à 800°C, resfriada lentamente e com os graus de moagem de 300±20, 400±20 e 500±20 m ² /kg.....	92
Figura 4.61 – Resistência à compressão (ABNT NBR 5751:1992) da CBCA versus a finura Blaine. Todas as amostras. Calcinação seguida de resfriamento lento.....	92
Figura 4.62 – Resistência à compressão (ABNT NBR 5751:1992) da CBCA “in natura” e calcinada nas temperaturas de 600, 700 e 800°C com resfriamento lento. Sem moagem.....	93

Figura 4.63 – Resistência à compressão (ABNT NBR 5751:1992) da CBCA “in natura” e calcinada nas temperaturas de 600, 700 e 800°C com resfriamento lento. Grau de moagem de 300±20 m2/kg.....	94
Figura 4.64 – Resistência à compressão (ABNT NBR 5751:1992) da CBCA “in natura” e calcinada nas temperaturas de 600, 700 e 800°C com resfriamento lento. Grau de moagem de 400±20 m2/kg.....	94
Figura 4.65 – Resistência à compressão (ABNT NBR 5751:1992) da CBCA “in natura” e calcinada nas temperaturas de 600, 700 e 800°C com resfriamento lento. Grau de moagem de 500±20 m2/kg.....	95
Figura 4.66 – Resistência à compressão (ABNT NBR 5751:1992) da CBCA versus a temperatura de calcinação. Todas as amostras. Calcinação seguida de resfriamento lento	95
Figura 4.67 – Resistência à compressão (ABNT NBR 5751:1992) da CBCA calcinada à 600°C, resfriada rapidamente e com os graus de moagem de 300±20, 400±20 e 500±20 m2/kg.....	96
Figura 4.68 – Resistência à compressão (ABNT NBR 5751:1992) da CBCA calcinada à 700°C, resfriada rapidamente e com os graus de moagem de 300±20, 400±20 e 500±20 m2/kg.....	96
Figura 4.69 – Resistência à compressão (ABNT NBR 5751:1992) da CBCA calcinada à 800°C, resfriada rapidamente e com os graus de moagem de 300±20, 400±20 e 500±20 m2/kg.....	97
Figura 4.70 – Resistência à compressão (ABNT NBR 5751:1992) da CBCA versus a finura Blaine. Todas as amostras. Calcinação seguida de resfriamento rápido.	98
Figura 4.71 – Resistência à compressão (ABNT NBR 5751:1992) da CBCA “in natura” e calcinada nas temperaturas de 600, 700 e 800°C com resfriamento rápido. Sem moagem	99
Figura 4.72 – Resistência à compressão (ABNT NBR 5751:1992) da CBCA “in natura” e calcinada nas temperaturas de 600, 700 e 800°C com resfriamento rápido. Grau de moagem de 300±20 m2/kg.....	99
Figura 4.73 – Resistência à compressão (ABNT NBR 5751:1992) da CBCA “in natura” e calcinada nas temperaturas de 600, 700 e 800°C com resfriamento rápido. Grau de moagem de 400±20 m2/kg.....	100
Figura 4.74 – Resistência à compressão (ABNT NBR 5751:1992) da CBCA “in natura” e calcinada nas temperaturas de 600, 700 e 800°C com resfriamento rápido. Grau de moagem de 500±20 m2/kg.....	100
Figura 4.75 – Resistência à compressão (ABNT NBR 5751:1992) da CBCA versus a temperatura de calcinação. Todas as amostras. Calcinação seguida de resfriamento rápido	101
Figura 4.76 – Comparação entre o índice de atividade pozolânica (IAP) com cimento Portland da CBCA utilizando a ABNT NBR 5752:1992 e a ABNT NBR 5752:1992 modificada. CBCA “in natura” e calcinadas seguida de resfriamento lento	102
Figura 4.77 – Comparação entre o índice de atividade pozolânica (IAP) com cimento Portland da CBCA utilizando a ABNT NBR 5752:1992 e a ABNT NBR 5752:1992 modificada. CBCA calcinadas seguida de resfriamento rápido.	102
Figura 4.78 – Comparação entre o índice de atividade pozolânica (IAP) com cimento Portland do Metacaulim utilizando a ABNT NBR 5752:1992 e a ABNT NBR 5752:1992 modificada	103
Figura 4.79 – Resistência à compressão (ABNT NBR 5751:1992) versus o índice de atividade pozolânica (IAP) com cimento Portland (ABNT NBR 5752:1992) da CBCA. Todas as amostras	104

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 - Composição química da cinza (% em peso).....	30
Tabela 2.2 – Comparação dos elementos químicos presentes na cinza de casca de arroz e na cinza do bagaço de cana-de-açúcar.	33
Tabela 3.1 - Análise semi-quantitativa por fluorescência de raios-X do metacaulim	38
Tabela 3.2 - Análise semi-quantitativa por fluorescência de raios-X da cinza do bagaço da cana-de-açúcar.	40
Tabela 3.3 - Análise semi-quantitativa por fluorescência de raios-X do cimento CPV-ARI	40
Tabela 3.4 - Análise semi-quantitativa por fluorescência de raios-X da cal hidratada	40
Tabela 3.5 - Características físicas e distribuição granulométrica da areia quartzosa.....	41
Tabela 3.6 - Quadro resumo das amostras e suas respectivas denominações.....	44
Tabela 4.1 - Quadro resumo das propriedades físicas dos materiais utilizados e da CBCA submetida aos tratamentos	51
Tabela 4.2 - Quadro resumo das propriedades da argamassa de referência e da argamassa com metacaulim. Moldagem de 6 corpos-de-prova	60
Tabela 4.3 - Quadro resumo das propriedades da argamassa de referência e das argamassas com cinza do bagaço de cana-de-açúcar. Resfriamento lento. Moldagem de 6 corpos-de-prova	60
Tabela 4.4 - Quadro resumo das propriedades da argamassa de referência e das argamassas com cinza do bagaço de cana-de-açúcar. Resfriamento rápido. Moldagem de 6 corpos-de-prova	61
Tabela 4.5 - Quadro resumo das propriedades da argamassa de referência e da argamassa com metacaulim. Moldagem de 6 corpos-de-prova. ABNT NBR 5752:1992 Modificada.....	75
Tabela 4.6 - Quadro resumo das propriedades da argamassa de referência e das argamassas com cinza do bagaço de cana-de-açúcar. Moldagem de 6 corpos-de-prova. ABNT NBR 5752:1992 Modificada. Resfriamento lento	76
Tabela 4.7 - Quadro resumo das propriedades da argamassa de referência e das argamassas com cinza do bagaço de cana-de-açúcar. Moldagem de 6 corpos-de-prova. ABNT NBR 5752:1992 Modificada. Resfriamento rápido.	76
Tabela 4.8 - Quadro comparativo do IAP (%) obtido com a ABNT NBR 5752:1992 e a ABNT NBR 5752:1992 modificada. Em negrito estão marcadas as amostras onde ocorreu o aumento do IAP.....	77
Tabela 4.9 - Quadro resumo das propriedades da argamassa de cal hidratada com metacaulim. Moldagem de 6 corpos-de-prova	88
Tabela 4.10 - Quadro resumo das propriedades das argamassas de cal hidratada com cinza do bagaço de cana-de-açúcar. Resfriamento lento. Moldagem de 6 corpos-de-prova	89
Tabela 4.11 - Quadro resumo das propriedades das argamassas de cal hidratada com cinza do bagaço de cana-de-açúcar. Resfriamento rápido. Moldagem de 6 corpos-de-prova.....	89

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	15
1.1	OBJETIVOS	18
1.2	ESTRUTURAÇÃO DO TRABALHO	18
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	19
2.1	CIMENTO PORTLAND E SUAS ADIÇÕES	19
2.2	HIDRATAÇÃO DO CIMENTO E REAÇÕES POZOLÂNICAS	22
2.2.1	Métodos de avaliação da atividade pozolânica	28
2.3	O USO DA CINZA DE BAGAÇO DE CANA COMO ADIÇÃO POZOLÂNICA	30
3.	PROGRAMA EXPERIMENTAL	38
3.1	DEFINIÇÃO DO PROGRAMA EXPERIMENTA	38
3.2	MATERIAIS EMPREGADOS	38
3.2.1	Tipos de pozolana: CBCA e pozolana de referência	38
3.2.2	Cimento Portland de referência	40
3.2.3	Cal hidratada	40
3.2.4	Areia	40
3.2.5	Aditivos	41
3.3	PLANEJAMENTO EXPERIMENTAL	42
3.3.1	Tipos de tratamento: moagem e calcinação	42
3.4	PROCEDIMENTOS DE ENSAIO	47
3.4.1	Caracterização química e física das amostras	47
3.4.2	ABNT NBR 5752:1992 e NBR modificada	48
3.4.3	ABNT NBR 5751:1992	49
4.	ANÁLISE DOS RESULTADOS	51
4.1	TRATAMENTOS DA CBCA	51
4.2	ABNT NBR 5752: 1992	59
4.2.1	CBCA “in natura” - Efeito da moagem	65
4.2.2	CBCA resfriada lentamente - Efeito da moagem	64
4.2.3	CBCA resfriada lentamente - Efeito da calcinação	67
4.2.4	CBCA resfriada rapidamente - Efeito da moagem	70
4.2.5	CBCA resfriada rapidamente - Efeito da calcinação	72
4.3	ABNT NBR 5752:1992 MODIFICADA	68
4.3.1	CBCA “in natura” - Efeito da moagem	77
4.3.2	CBCA resfriada lentamente - Efeito da moagem	78
4.3.3	CBCA resfriada lentamente - Efeito da calcinação	80
4.3.4	CBCA resfriada rapidamente - Efeito da moagem	83
4.3.5	CBCA resfriada rapidamente - Efeito da calcinação	85
4.4	ABNT NBR 5751:1992	88
4.4.1	CBCA “in natura” - Efeito da moagem	90
4.4.2	CBCA resfriada lentamente - Efeito da moagem	90
4.4.3	CBCA resfriada lentamente - Efeito da calcinação	93
4.4.4	CBCA resfriada rapidamente - efeito da moagem	95
4.4.5	CBCA resfriada rapidamente - Efeito da calcinação	98
4.5.	ABNT NBR 5752:1992 VERSUS ABNT NBR 5752:1992 MODIFICADA	101
4.6.	ABNT NBR 5752:1992 VERSUS ABNT NBR 5751:1992	103
5.	CONCLUSÕES	106
5.1	PROPOSTAS PARA TRABALHOS FUTUROS	108
	REFERÊNCIAS	110
	APÊNDICE	115

1.INTRODUÇÃO

Este trabalho está inserido na linha de pesquisa do Departamento de Engenharia Civil Centro de Tecnologia e Geociências da Universidade Federal de Pernambuco, que enfoca o reaproveitamento de resíduos na Construção Civil. O resíduo estudado é a cinza do bagaço de cana-de-açúcar (CBCA), subproduto da Indústria Sucroalcooleira, visando sua aplicação como adição ao cimento Portland. Neste trabalho, aborda-se questão da atividade pozolânica mensurada por métodos físicos previstos na denominação de norma da Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT), NBR 5751:1992 e NBR 5752:1992.

É crescente o estudo da utilização de resíduos na construção civil, com maior ênfase em duas vertentes: como substituição parcial do cimento Portland ou como substituição parcial do agregado miúdo. De modo geral, o emprego destes materiais visa obter um destino adequado aos mesmos e contribuir no desempenho do composto cimentício ao qual o resíduo é incorporado. Neste estudo, o foco será na utilização do resíduo como substituição parcial do cimento Portland, para isto, o resíduo deverá apresentar características que o classifiquem como um material pozolânico. Segundo NBR 12653:1992 os pozolânicos são materiais silicosos ou silicoaluminosos que, por si só, possuem pouca ou nenhuma propriedade cimentante, mas quando finamente divididos e na presença de umidade reagem quimicamente com o hidróxido de cálcio à temperatura ambiente para formar compostos com propriedades cimentantes.

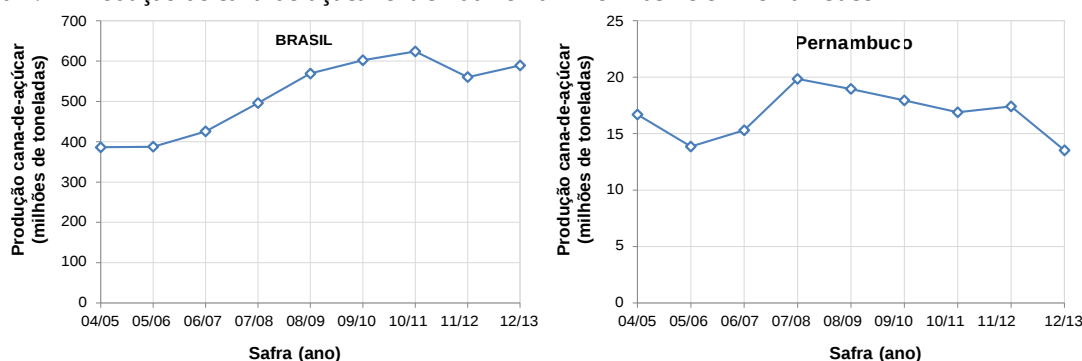
Existem resíduos de processos industriais que são característicos do estado de Pernambuco, como o bagaço de cana-de-açúcar, e que são poucos abordados por estudos sistemáticos para o seu emprego na construção civil. Por se tratar de resíduos de processo, o interesse em utilizá-los deve ser estimulado e desenvolvido, pois apresentam características importantes para a produção de novos componentes construtivos com vantagens econômicas e ambientais. O incessante avanço tecnológico, em busca do progresso, consome muita matéria prima na produção de bens que são utilizados para atender à demanda social do mundo moderno. Os inúmeros processos industriais de fabricação trazem consigo uma vasta gama de resíduos que, muitas vezes, são depositados inadequadamente no meio ambiente. Exemplos disso são as usinas de processamento de cana-de-açúcar para produção de etanol e açúcar, que geram alguns resíduos industriais como a cinza de bagaço de cana-de-açúcar.

Atualmente, o Brasil é o maior produtor mundial de cana-de-açúcar, açúcar e álcool, além de ser o maior exportador mundial de açúcar. Os crescentes consumos de açúcar dos países

emergentes, bem como, o aumento da frota de carros com a tecnologia flex, notoriamente no Brasil e Estados Unidos, estimulam o contínuo crescimento da produção nacional de açúcar e etanol. No acumulado desde o início da safra de 2013/2014 até 16 de outubro, a produção de açúcar cresceu 1,32%, totalizando 27,15 milhões de toneladas este ano, já o etanol teve um aumento de produção de 20,57% chegando à marca de 20,19 bilhões de litros produzidos em um ano (ÚNICA, 2012).

Estes fatos têm impulsionado cada vez mais o plantio de cana-de-açúcar do Brasil, cuja produção se concentra principalmente no Centro-Sul e no Norte-Nordeste, o que permite dois períodos de safra (ÚNICA, 2012). Os estados brasileiros com maior produção de cana-de-açúcar são: Alagoas, Minas Gerais, São Paulo, Goiás, Pernambuco e Paraná (todos com produção maior do que 20 milhões de toneladas, safra 07/08). Na Figura 1.1, apresenta-se a evolução da produção de cana-de-açúcar no Brasil e em Pernambuco até 2012.

Figura 1.1 - Produção de cana-de-açúcar entre 2004 e 2012 no Brasil e em Pernambuco



Fonte:(Única, 2013).

Nas etapas de produção do açúcar e do álcool, o resíduo resultante de maior volume é o bagaço de cana-de-açúcar. Porém, nos últimos anos, o bagaço foi bastante valorizado por sua utilização como matriz energética de termoeletricas. De modo geral, o processo de produção de energia elétrica utilizando o bagaço é baseado em sua queima nas caldeiras da usina gerando vapor. O vapor gerado é utilizado para movimentar turbinas, que por sua vez movimentam os geradores elétricos. Em estudo de caso, Dantas Filho (2009) constatou que uma usina com produção em torno de 3 milhões de toneladas de cana moída gerou em torno de 740 mil toneladas de bagaço, que por sua vez, sua queima em caldeiras resultou em 29 MW de energia.

Dessa co-geração de energia, o resíduo produzido é a cinza do bagaço de cana. Para cada tonelada de cana-de-açúcar moída ocorre a geração de em torno de 250 kg de bagaço de cana, o qual é queimado nas caldeiras, que por sua vez produz aproximadamente 6 quilos (2,4 %) de cinza (ROMERO, 2009). Com base nesta estimativa, em 2011, o Brasil produziu cerca de

3,7 milhões de toneladas de cinza do bagaço de cana. No Estado de Pernambuco, a estimativa é de 100 mil toneladas cinza do bagaço de cana. Esse resíduo é utilizado nas usinas como fertilizante nas lavouras de cana, mesmo não tendo propriedades que justifiquem o seu uso.

Diante da abundância deste material e seu potencial para a utilização na construção civil, já há duas linhas de pesquisas que propõem sua reutilização para a produção de argamassas e concretos. A primeira delas propõe a utilização da CBCA como agregado miúdo substituindo parcialmente a areia utilizada para a produção da pasta de cimento. Já a segunda linha de pesquisa defende a incorporação da cinza ao cimento Portland como adição pozolânica, permitindo assim a redução do consumo de clínquer pela indústria cimentícia e a melhoria da durabilidade dos concretos e argamassas produzidos com esse tipo de adição.

A questão da existência da pozolanicidade na CBCA ainda não é definitiva (CORDEIRO, 2006; PAULA, 2006; CORDEIRO et al., 2007; NUNES, 2009; ZARDO et al., 2004). Existem pesquisas que evidenciam a atividade pozolânica de amostras de cinza de bagaço de cana-de-açúcar (FREITAS, 2005), porém, outras pesquisas demonstram o contrário (ZARDO et al., 2004), indicando que este tipo de material funciona como fíler. Contudo, todos os pesquisadores citados apresentam aspectos benéficos do uso de cinza de bagaço de cana-de-açúcar, seja explicado pelo efeito pozolânico ou pelo efeito fíler. O fato de a cinza apresentar efeito pozolânico significa que o material tem a capacidade de reduzir o calor de hidratação do cimento, de inibir a reação álcali-agregado, elevar a resistência ao ataque por cloretos e sulfatos, ou seja, resumindo, a pozolana é uma adição que eleva a durabilidade do concreto com relação a muitos agentes agressivos.

Desse modo, o estudo do aproveitamento deste resíduo da indústria agrícola é de grande importância para a indústria da construção civil. É neste sentido que se encontra a justificativa desta pesquisa, estudar uma forma de resolver a questão do incremento da produção de etanol; e, conseqüentemente, de geração de bagaço de cana-de-açúcar, propondo uma utilização deste material em uma aplicação agregadora de valor a um produto de outra indústria de grande importância nacional, a indústria da construção civil. É importante ressaltar que em ambos os casos existem uma contribuição para a sustentabilidade do meio ambiente: pelo lado da indústria agrícola existe a destinação de um resíduo gerado em uma de suas atividades; e pelo lado da indústria da construção civil existe a substituição parcial do cimento Portland, responsável por grande consumo de fontes naturais de calcário e argila e emissão de CO₂, por um resíduo industrial que melhora alguma das propriedades da pasta de cimento.

OBJETIVOS

Os objetivos visados foram os seguintes:

- Analisar o efeito do grau de moagem da cinza nas propriedades estudadas;
- Analisar o efeito do tratamento térmico aplicado nas propriedades estudadas;
- Analisar a atividade pozolânica da CBCA comparativamente ao material pozolânico de referência;
- Verificar a congruência dos efeitos dos tratamentos aplicados;
- Dar subsídio teórico para a futura utilização da cinza de bagaço de cana-de-açúcar como adição para cimento Portland.

ESTRUTURAÇÃO DO TRABALHO

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

O segundo capítulo trata da revisão bibliográfica sobre a cinza do bagaço de cana-de-açúcar. Estudos importantes para o entendimento da atividade pozolânica também fazem parte deste capítulo.

No terceiro capítulo descreve-se o programa experimental, materiais e métodos utilizados neste estudo.

No quarto capítulo, apresenta-se a discussão dos resultados, com a análise da influência dos tratamentos aplicados à CBCA e o comparativo com a pozolana de referência.

As conclusões estão dispostas no quinto capítulo, assim como propostas para pesquisas futuras. No final do trabalho, encontram-se as referências bibliográficas utilizadas neste estudo.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

CIMENTO PORTLAND E SUAS ADIÇÕES

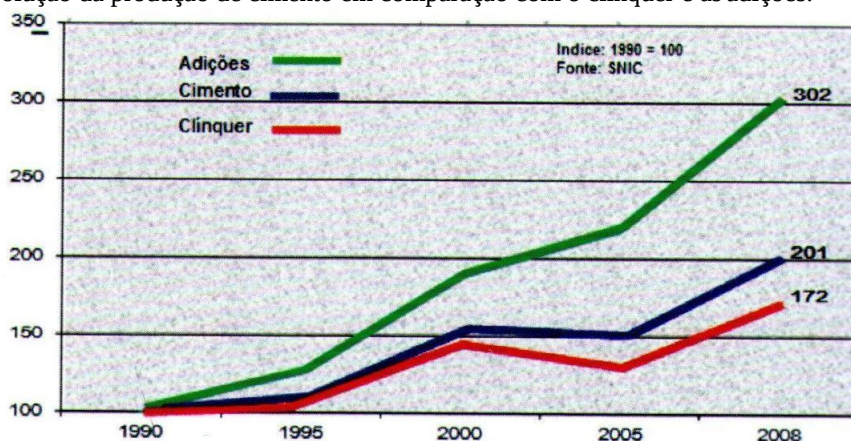
Atualmente, o cimento Portland é indispensável na construção civil, pois é a principal matéria prima utilizada na produção de concretos e argamassas. Trata-se de um material seco, pulverulento, que após ser misturado com água adquire propriedades aglomerantes sendo capaz de unir materiais inertes como a areia e a brita. Após um período de cura, a pasta de cimento se torna rígida e ganha resistência mecânica. Após passar por um processo de hidratação, o cimento adquire resistência à água, por esta razão é classificado como um aglomerante hidráulico.

Por razões técnicas, ambientais e econômicas, as adições normalizadas vêm sendo utilizadas cada vez mais não somente no Brasil, mas também em âmbito mundial como constituintes dos cimentos, moídas em conjunto com o clínquer, ou separadamente. (ISAIA, 2011, p. 188)

Como a produção do clínquer envolve alto consumo energético e a emissão de gás carbono na atmosfera, devido à queima da argila e do calcário, ao substituir parte deste, além de vantagens econômicas, se tem uma série de benefícios ambientais. Boa parte das adições utilizadas pela indústria cimentícia provém de resíduos industriais, o que aumenta ainda mais os benefícios ambientais do seu uso. Os principais são: redução do consumo de energia no processo de fabricação do cimento, diminuição da emissão de CO₂ na atmosfera, evita o esgotamento precoce de jazidas de calcário, contribui para a reciclagem de rejeitos industriais.

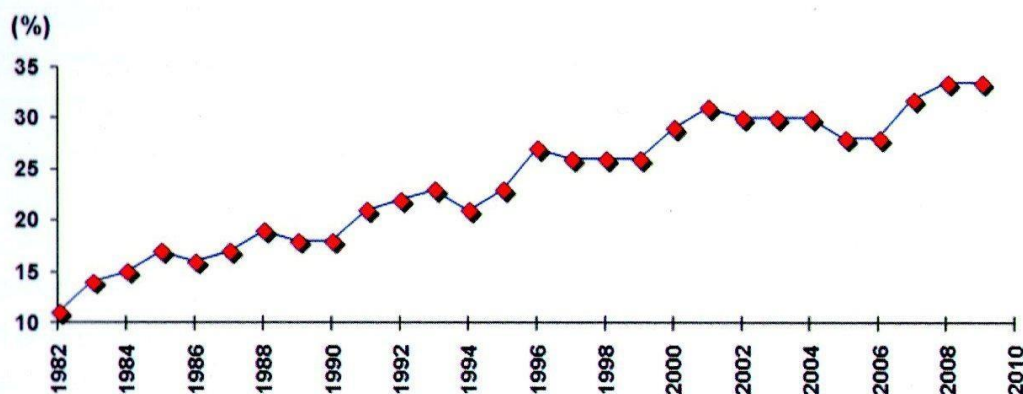
O uso de cimentos com adição se iniciou timidamente na década de 50 do século passado, ganhou enorme impulso a partir da década de 90 e, atualmente, quase que 100% do cimento comercializados no Brasil possui adição. Abaixo há dois gráficos que demonstram claramente a evolução no uso de adições segundo estudos do Sindicato Nacional da Indústria do Cimento (SNIC). No primeiro gráfico se compara o crescimento da produção do cimento do clínquer e das adições entre os anos de 1990 e 2008. Já o segundo gráfico demonstra o aumento das porcentagens de adição utilizadas no cimento entre 1982 e 2010.

Figura 2.1 - Evolução da produção de cimento em comparação com o clínquer e as adições.



Fonte: (ISAIA, 2011, p. 224).

Figura 2.2 - Evolução no uso de adições ao cimento em substituição ao clínquer.



Fonte: (ISAIA, 2011, p. 224).

Com o crescente uso de adições no cimento Portland surgiu uma série de estudos sobre os benefícios que estas trazem para os concretos e argamassas. Consequentemente, se identificou as principais características dessas adições e como elas reagem quimicamente com o clínquer. O passo seguinte foi buscar novos tipos de adições, que tivessem baixo custo e comprovada eficácia.

As adições são normalmente de origem mineral e já eram utilizadas em construções muito antes da descoberta do cimento Portland. Segundo Isaia (2011), a antiga civilização Greco-romana, já no século V a.C, utilizava as cinzas vulcânicas juntamente com cal hidratada para produção de um aglomerante hidráulico, o qual misturado à areia e água se converte em argamassa de cal hidratada. Após a descoberta, em 1824, do cimento Portland as cinzas vulcânicas também passaram a serem utilizadas na produção de cimento com adição.

Como existem poucas regiões do mundo com abundância de cinzas vulcânicas, a indústria cimentícia priorizou o uso de outros materiais, existentes em maior abundância, para serem

utilizados como adições. Dependendo de suas características físicas e químicas, as adições minerais podem ser subdivididas em três categorias: inertes, pozolânicas e cimentantes.

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

Já as adições cimentantes têm propriedades aglomerantes e produzem produtos hidratados similares ao do clínquer, porém, normalmente hidratam e ganham resistência mecânica lentamente. Se estiverem misturadas ao cimento terão seu processo de hidratação acelerado, podendo inclusive substituir até 70% do clínquer. Os seguintes resíduos industriais são utilizados como adições cimentantes: escória granulada de alto-forno e cinza volante com alto teor de cálcio.

Por fim as adições pozolânicas, segundo a NBR 12653:1992, são materiais silicosos ou sílico-aluminosos que por si só possui pouca ou nem uma propriedade cimentícia, mas quando finamente dividido e na presença de umidade, reage quimicamente com os produtos hidratados do clínquer para formar compostos com propriedades aglomerantes. São exemplos de pozolanas cinzas vulcânicas, cinzas volantes com baixo teor de cálcio, cinza da casca de arroz, sílica ativa e metacaulim.

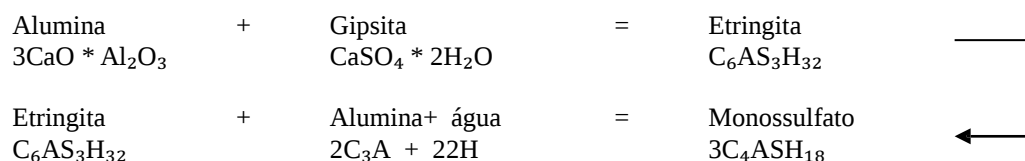
A NBR 12653:1992 classifica as pozolanas em 2 categorias de acordo com a origem do material: natural e artificial. As naturais são as cinzas de origem vulcânica que não precisam de nenhum tratamento para serem utilizadas como material pozolânico. Já as artificiais precisam de tratamento térmico para adquirirem propriedades pozolânicas ou são subprodutos industriais. Tanto as pozolanas artificiais quanto as naturais podem necessitar de peneiramento, britagem e moagem para adquirirem uma granulometria adequada para serem utilizadas como adição.

As adições pozolânicas podem entrar na mistura da argamassa ou do concreto no lugar de parte do agregado miúdo ou como componente do cimento Portland, substituindo até 50% do clínquer. Para entender como ocorrem as reações pozolânicas e as vantagens da incorporação deste tipo de adição em argamassas e concretos é necessário, primeiramente, compreender os processos químicos que levam à formação da pasta de cimento hidratada.

HIDRATAÇÃO DO CIMENTO E REAÇÕES POZOLÂNICAS

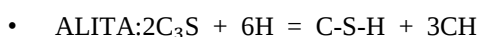
O poder aglomerante do cimento vem do processo de hidratação do clínquer, ou seja, de sua reação química com a água para formar compostos mais estáveis com características de pega e endurecimento. Segundo Taylor (1997), o clínquer é formado basicamente por Silicatos e Aluminatos, além de alguns óxidos em menor proporção. Por convenção, os Aluminatos presentes no clínquer são denominados de Alumina (C_3A) e Ferrita (C_4AF) e, conjuntamente, correspondem de 10% à 25% do clínquer em volume.

Os Aluminatos hidratam muito rapidamente, provocando o enrijecimento da pasta de cimento e, conseqüentemente, sua perda de mobilidade. Para retardar a hidratação do aluminatos e, assim, prolongar o tempo de pega da pasta de cimento, se adiciona ao cimento Portland uma pequena quantidade de Gipsita ($CaSO_4$). A reação química entre a Alumina, a Gipsita e a água se dá nas primeiras 24h, formando cristais de Etringita ($C_6AS_3H_{32}$). Parte da Etringita é posteriormente convertida em Monossulfatos (C_4ASH_{13}), estágio final da hidratação dos Aluminatos.



Já os silicatos têm uma hidratação mais lenta. Eles são subdivididos em duas fases: Alita (C_3S), que corresponde a 50% à 70% do volume do clínquer, e a belita (C_2S), que varia entre 15% e 30%. Por estarem em maior quantidade, os Silicatos são os compostos mais importantes do clínquer e responsáveis pela alta resistência mecânica da pasta de cimento endurecida.

Estudos de DRX, publicados por H.F.W. Taylor demonstram que, após ser misturada com água, 70% da Alitareage em 28 dias e quase 100% em um ano. Para cada molécula de Alita hidratada se produz uma molécula de C-S-H ($C_3S_2H_3$) e 3 moléculas de hidróxido de cálcio (CH).



O C-S-H é um gel amorfo de silicato de cálcio hidratado que, segundo o modelo de Powers-Brunauer, tem uma estrutura em camadas com uma elevada área superficial. É o composto mais abundante na pasta de cimento compondo de 50 a 60% de seu volume. Os cristais de C-S-H tem a tendência de se aglomerarem e são eles os principais elementos de ligação da pasta

de cimento, uma vez que, estabelecem entre si ligações que asseguram a união das fases sólidas e determinam a sua coesão e adesão.

Por sua vez, o hidróxido de cálcio, também chamado de portlandita, forma grandes cristais em estrutura hexagonal que possuem reduzida área superficial. Este composto constitui 20 a 25% do volume de sólidos na pasta de cimento hidratada. O CH também contribui com a coesão e adesão das partículas sólidas da pasta de cimento, porém de forma menos ativa que o C-S-H. A Belita é a fase do clínquer que hidrata mais lentamente. Ainda, segundo estudos de DRX, apenas 30% da Belita reage com 28 dias e 90% reage após um ano. Sua hidratação produz uma molécula de CSH e uma de CH.

Diante destes dados, se observa que a hidratação da Alita dá à pasta de cimento resistência mecânica nas suas primeiras idades e a hidratação da Belita interfere mais diretamente na resistência mecânica em idades avançadas. Outro ponto a ser observado é que a hidratação da Alita (C_3S) produz 61% de C-S-H e 39% de CH, enquanto a hidratação da Belita (C_2S) gera 82% de C-S-H e 18% de CH.

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

Contudo, o uso de cimento com elevados teores de Belita não é a única forma de se obter uma pasta de cimento com grandes quantidades de C-S-H. As adições pozolânicas são capazes de converter a portlandita em compostos de C-S-H, melhorando assim, a resistência mecânica da pasta de cimento em idades avançadas.

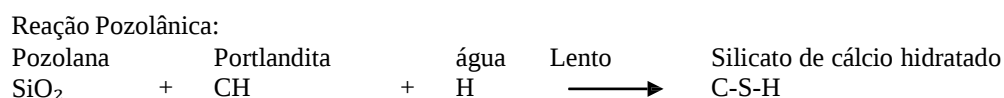
A NBR 12653:1992 estabelece que para um material ser considerado pozolânico a soma de seus óxidos de SiO_2 , Al_2O_3 e Fe_2O_3 deve totalizar no mínimo 50% de sua massa, sendo justamente estes óxidos responsáveis pela transformação da portlandita em C-S-H.

Segundo Mehta e Monteiro (2008) a reação pozolânica é uma reação do tipo ácido base, onde os óxidos (ácidos) da pozolana reagem com a cal (básica) presente na portlandita. Entretanto é importante ressaltar que é necessário que os óxidos de sílica e alumina estejam no estado amorfo, ou seja, instáveis para serem vulneráveis ao hidróxido de cálcio.

Conforme Massazza (1998), o clínquer e a pozolana reagem em diferentes estágios da hidratação da pasta de cimento, sendo a reação pozolânica mais lenta já que esta só se inicia entre 7 e 15 dias após o início da hidratação do clínquer. Devido a este fato, o cimento com pozolana possui menor calor de hidratação e desenvolve resistência mecânica mais lentamente.

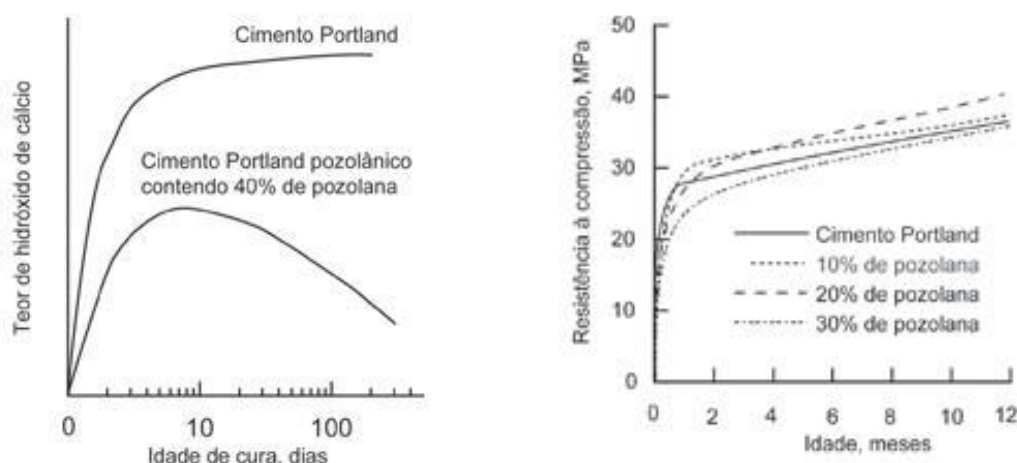
Como regra prática, o calor de hidratação total produzido pelas reações pozolânicas envolvendo a adição mineral é considerado como a metade do calor médio produzido pela hidratação do cimento Portland (MEHTA; MONTEIRO, 2008, p. 317)

Para obras de grandes dimensões onde há a concretagem simultânea de extensas áreas, ou para obras realizadas em regiões com altas temperaturas, ou ainda para misturas com elevado consumo de cimento, deve haver um controle do calor liberado na hidratação do cimento. Caso esse controle não seja realizado, o concreto tende a desenvolver fissuras térmicas que comprometem seu desempenho. Nestes casos é recomendável o uso de adições pozolânicas para se reduzir o calor de hidratação.



Conforme é possível observar no esquema acima e no gráfico da esquerda que segue logo abaixo, a reação pozolânica consome os cristais de hidróxido de cálcio existente na pasta de cimento hidratada, transformando-o no gel de C-S-H. Além de transformações químicas a pozolana também causa efeitos físicos na pasta de cimento. A ação simultânea dos fenômenos físicos e químicos causados pela adição pozolânica deixa a pasta de cimento menos porosa e mais resistente em idades avançadas como demonstra o gráfico a direita que segue abaixo.

Figura 2.3 - Gráfico da esquerda: Efeito da idade de cura no teor de hidróxido de cálcio de uma argamassa de cimento e areia preparada com cimento Portland pozolânico. Gráfico da direita: Comparativo da resistência com cimentos com diferentes proporções de pozolana.



Fonte: (MEHTA; MONTEIRO, 2008, p. 240)

Segundo Molin apud Isaia (2011), a adição pozolânica causa os seguintes efeitos na pasta de cimento: efeito microfíler, refinamento da estrutura dos poros e do tamanho dos grãos dos produtos hidratados do cimento e alteração da microestrutura e da zona de transição em

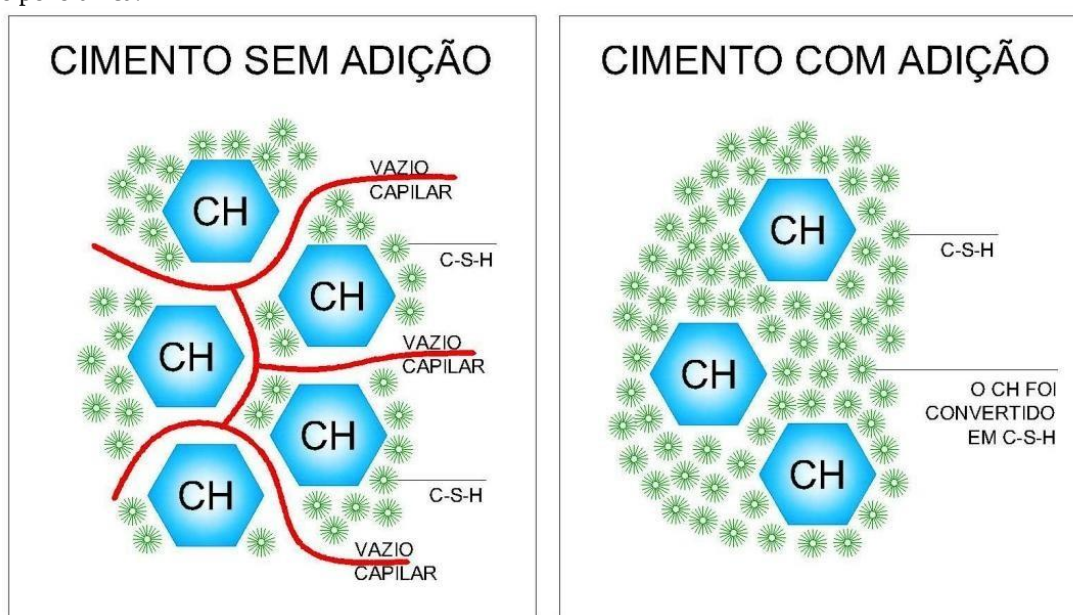
concretos. Todos estes efeitos são extremamente benéficos melhorando, em longo prazo, a durabilidade e a resistência mecânica de argamassas e concretos com este tipo de adição.

O efeito microfíler ocorre quando as micropartículas da adição preenchem os vazios entre as partículas de cimento e areia deixando a mistura mais densa e com melhor empacotamento de suas partículas. Devido ao efeito fíler se obtém argamassas e concretos com melhor trabalhabilidade no estado fresco e menor porosidade no estado endurecido.

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

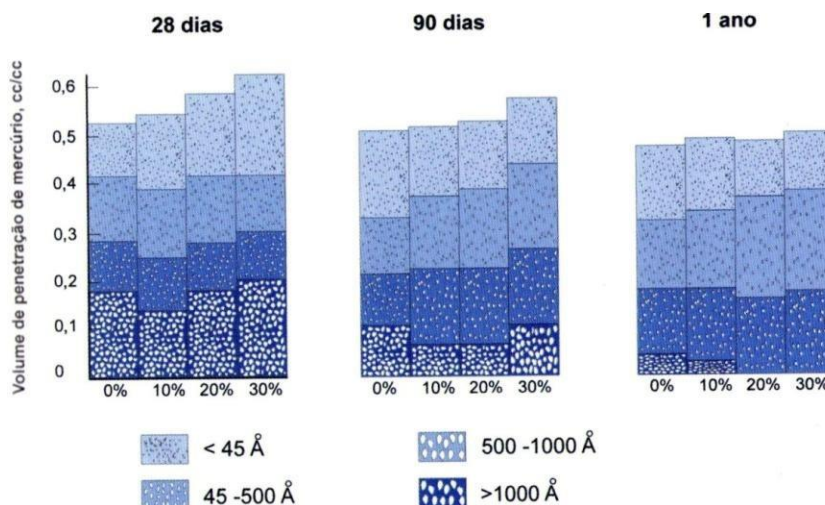
Além de funcionar como ponto de nucleação e barreira para o crescimento de grandes cristais, a pozolana também converte o CH em C-S-H, como já foi mencionado. Essa reação química é o principal diferencial entre as pozolânicas e as demais adições minerais e também contribui para o refinamento dos poros e dos grãos. As partículas de C-S-H são menores, sendo capazes de ocupar vazios capilares, e possuem maior área específica, proporcionando a pasta de cimento resistência mecânica. Segue abaixo esquema gráfico que demonstram a mudança na distribuição do tamanho dos poros na pasta de cimento devido às reações pozolânicas.

Figura 2.4 - Esquema gráfico que representa a micro estrutura de uma pasta de cimento hidratada com e sem adição pozolânica.



Fonte: Produzido pela autora.

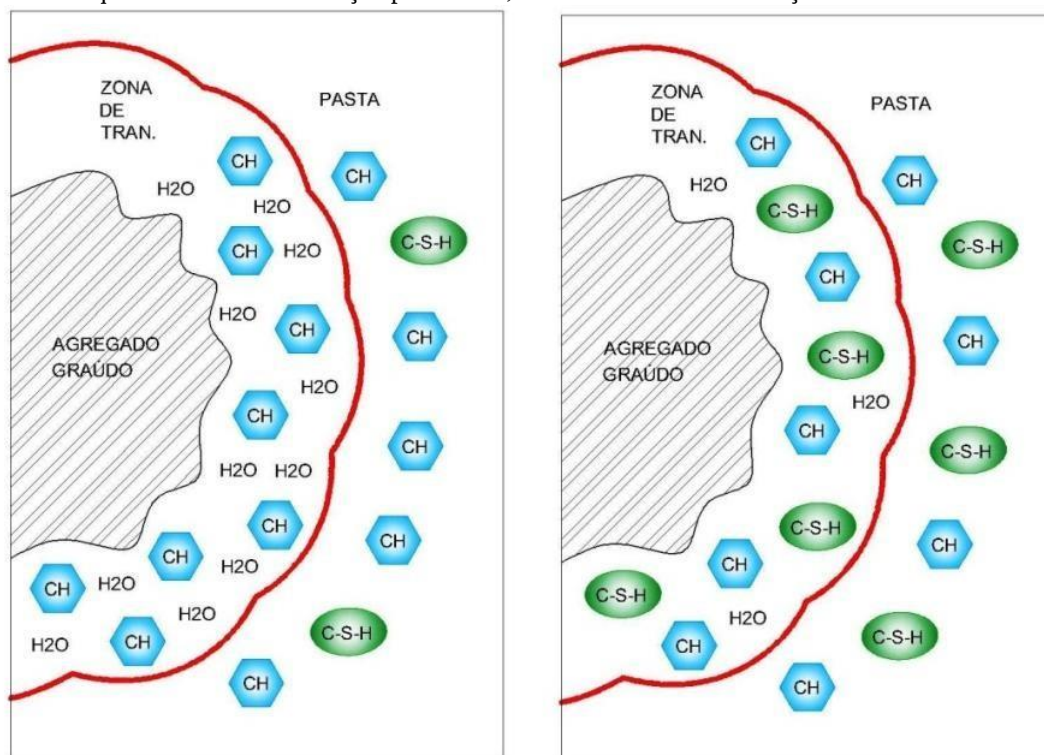
Figura 2.5 - Mudanças na distribuição de tamanho dos poros de pasta de cimento com teores variáveis de pozzolana.



Fonte: MEHTA; MONTEIRO, 2008, p. 237.

Outro efeito químico provocado pela reação pozolânica é a alteração da microestrutura da zona de transição, cujos benefícios são extremamente vantajosos para estruturas de concreto. Normalmente, há um acúmulo de água livre, que não está quimicamente combinada, rente aos agregados graúdos do concreto. Essa água enfraquece a zona de transição entre a pasta e o agregado, sendo normalmente a região onde o concreto fratura. A adição pozolânica reduz o acúmulo de água livre e transforma o CH em excesso na zona de transição no gel de C-S-H, aumentando assim a resistência mecânica do concreto, como demonstra o esquema abaixo.

Figura 2.6 - Esquema gráfico que representa a zona de transição entre agregado graúdo e a pasta de cimento hidratada. A esquerda cimento sem adição pozolânica, a direita cimento com adição.



Fonte: produzido pela autora.

A adição pozolânica, combinada com aditivos redutores de água, é fundamental para a produção de concretos de alto desempenho, de alta resistência e auto-adensável. Apenas o cimento Portland comum não é capaz de conferir aos concretos especiais elevada resistência mecânica e durabilidade combinadas com adequada trabalhabilidade.

(...)os prováveis benefícios de engenharia a serem obtidos com o uso de adições minerais no concreto incluem melhor resistência à fissuração térmica devido ao baixo calor de hidratação; aumento da resistência final e impermeabilidade devido ao refinamento dos poros, fortalecimento da zona de transição na interface, e uma durabilidade muito maior no que diz respeito ao ataque por sulfato e à expansão pela reação álcali agregado. (MEHTA; MONTEIRO, 2008, p. 317).

Uma das principais vantagens da utilização de adição pozolânica em concretos é o aumento de sua durabilidade. A reduzida porosidade da pasta de cimento com adição dificulta a entrada de agentes agressivos ao concreto e à sua armadura como gás carbono, íons de cloreto, soluções ácidas e sulfato. A pozolana também inibe a reação álcali-agregado que ocorre entre a Portlandita, presente na pasta de cimento, e o agregado graúdo, quando este possui fases mineralógicas reativas. Esta reação gera um gel expansivo no interior do concreto que leva à fissuração do mesmo. Como a pozolana consome as moléculas de CH , a reação álcali-agregado fica inibida de ocorrer por haver reduzida quantidade de álcalis livres no sistema.

Diante das inúmeras vantagens do uso de materiais pozzolânicos, a indústria e a comunidade acadêmica já descobriram diferentes materiais que, com ou sem tratamento, possuem esta propriedade. A NBR 12653:1992 classifica as pozolanas em duas categorias de acordo com a origem do material: natural e artificial. Quando a pozolana provem de minerais de origem vulcânica é classificada como natural. Já as provenientes de tratamento térmicos ou subprodutos industriais são classificadas como artificiais.

A partir da descoberta da pozolana natural pela civilização Greco-romana até os dias atuais, com a produção de pozolanas artificiais provenientes de sofisticados tratamentos térmicos, físicos e químicos, já se avançou muito no estudo deste material. Contudo, ainda há resíduos industriais que possuem grande potencial para serem utilizados como adição pozzolânica, mas que ainda carecem de estudos sistemáticos quanto à avaliação de sua atividade pozzolânica. Este é o caso da cinza de bagaço de cana, objeto do estudo do presente trabalho.

2.2.1 Métodos de avaliação da atividade pozzolânica

Dentro do objetivo de utilizar a CBCA como substituição parcial do cimento Portland, surgiu o questionamento de como determinar a atividade pozzolânica de um determinado material. Existem diversos métodos considerados tradicionais para a determinação da atividade pozzolânica, geralmente divididos nos que mensuram um parâmetro de resistência mecânica (neste trabalho, definidos como “métodos físicos”) e nos que mensuram de forma direta ou indireta a reação química que caracteriza a existência da atividade pozzolânica (neste trabalho, definidos como “métodos químicos”).

Existe uma grande diversidade de críticas aos métodos físicos existentes e prescritos pela NBR 12653:1992, que trata sobre materiais pozzolânicos, notadamente a NBR 5751:1992 que determina o índice de atividade pozzolânica com cal hidratada (IAC) e a NBR 5752:1992 que determina o índice de atividade pozzolânica com cimento Portland (IAP) (GAVA, 1999; CORDEIRO, 2006; POUEY, 2006; CORDEIRO, 2009). Estes dois métodos têm como parâmetro de atividade pozzolânica a determinação da resistência à compressão, porém, fixam o índice de consistência como parâmetro de dosagem das misturas, levando a diferentes relações água/aglomerante nas misturas ensaiadas. Como é consensual, a resistência mecânica está diretamente relacionada com a relação água/aglomerante, portanto, a sua variação acaba influenciando mais do que a possível atividade pozzolânica.

Os métodos químicos mais tradicionais prescritos por normas brasileiras são método Chapelle modificado (NBR 15895:2010) e o método de Fratini (NBR 5753:1992), também existe o

Método de Lúxan (LUXAN et al., 1989) que utiliza conceitos de condutividade elétrica para avaliar a atividade pozolânica. Estes métodos têm como principal característica a obtenção de resultados rápidos, quando comparados aos ensaios de resistência mecânica, mas estes também sofrem críticas comuns aos métodos ditos químicos. Portanto, estes métodos químicos não acompanham a evolução da reação pozolânica, porém, de certa forma, são bastante úteis justamente por fornecer rapidamente parâmetros sobre o potencial pozolânico de um material estudado sem que sejam necessários estudos de longo prazo. Taylor (1997) afirma que os métodos químicos são limitados no seu uso em razão da pouca representatividade na resistência mecânica aos 28 dias, a qual depende mais da relação água/aglomerante do que a atividade pozolânica. O autor ainda sugere que os métodos químicos não substituem a observação das propriedades com aplicação do material com potencial pozolânico em argamassas e, preferencialmente, concretos. Gava e Prudêncio (2007a) também afirmam que ambos os métodos podem não ser eficazes em fornecer parâmetros sobre o desempenho de um material supostamente pozolânico em concretos.

Deste modo, está evidenciado que os métodos químicos e os métodos físicos são divergentes no seu processo de obtenção dos resultados, porém, são conceitualmente coerentes na tentativa de obter parâmetros sobre atividade pozolânica de um determinado material. Portanto, é coerente que as pesquisas sobre atividade pozolânica caminham para estudos que abordem a utilização de métodos químicos e mecânicos de forma conjunta, de modo a ter análises complementares de curto prazo e de longo prazo. No entanto, existem diversos estudos que utilizaram esta abordagem conjunta e não chegaram a resultados congruentes, isto é, materiais eram considerados pozolânicos por um determinado método e não pozolânicos por outros (GAVA, 1999; WEBER, 2001; GAVA; PRUDENCIO, 2007a; GAVA; PRUDENCIO, 2007b; POUEY, 2006).

Existem estudos que utilizam de forma isolada técnicas de caracterização da microestrutura para a avaliação da atividade pozolânica (PAYÁ et al., 2003; MOROPOULOU et al., 2004; ESTEVES, 2011) e técnicas que avaliam a variação da condutividade elétrica (VILLAR-COCIÑA et al., 2003; WANSOM et al., 2010; AUBERT et al., 2012), mas que carecem de uma abordagem mais ampla e sistêmica.

2.3 O USO DA CINZA DE BAGAÇO DE CANA COMO ADIÇÃO POZOLÂNICA

Um dos subprodutos da produção da cana-de-açúcar é o seu bagaço, assim como a sacarose e a palha. Atualmente utiliza-se o bagaço gerado da usina na produção da energia, tornando a usina autossustentável energeticamente e, em alguns casos, há venda do excedente de energia para distribuidoras (NUNES et al., 2008). A queima do bagaço da cana é a principal forma de geração de energia dentro de uma usina de cana-de-açúcar. Esta produz uma grande quantidade de cinza pesada (que fica no fundo das caldeiras), composta basicamente de materiais inorgânicos (em sua maioria sílica) e com aspecto grosseiro (BORLONI et al., 2006).

A queima do bagaço gera aproximadamente 6 quilos de cinza para cada tonelada de bagaço. Atualmente, a cinza está sendo utilizada em atividades pouco nobres, como a fertilização de lavouras, mesmo sabendo-se que não existam pesquisas que atestem estes fins (LIMA et al., 2009). A composição química, determinada através de espectrometria de fluorescência de raios-x, da cinza de bagaço de cana-de-açúcar pode ser observada na Tabela 2.1.

Tabela 2.1 - Composição química da cinza (% em peso).

SiO ₂	Fe ₂ O ₃	K ₂ O	CaO	TiO ₂	SO ₃	ZrO ₂	Cr ₂ O ₃	MnO	Sc ₂ O ₃	ZnO	V ₂ O ₅
83,7	6,5	6,15	1,18	1,16	0,68	0,30	0,094	0,081	0,04	0,037	0,029

Fonte: PAULA, 2006

Corroborando o uso inadequado do cinza como adubo, Manhães (1999) afirma que a cinza do bagaço é um material de difícil degradação e que apresenta poucos nutrientes minerais. Contudo, o processo de produção deste resíduo é indissociável das etapas de produção do etanol e do açúcar. Souza resume o processo de corte da cana-de-açúcar até a queima do bagaço (Figura 2.7 - Processo de geração das CBCA):

Após o corte (a), a cana-de-açúcar é transportada para a unidade industrial (b), onde é lavada para retirar a terra e impurezas provenientes da lavoura, é desfibrada (d) e enviada à moenda para extração do caldo. Em geral, cerca de 96% do açúcar contido na cana é extraído. O bagaço resultante, com cerca de 4% de açúcar e umidade média de 50%, é transportado da moenda para depósitos a céu aberto (e, f) onde permanece até a disposição final, que pode ser a queima em caldeira, devolução as lavouras ou vendido a outras indústrias do setor, quando sua produção é maior que a capacidade de queima na caldeira. Durante a queima do bagaço, a caldeira produz resíduos que podem ser lançados na atmosfera ou contidos pelos lavadores de cinzas e gases (j). As águas residuais transportam as cinzas até as lagoas de decantação (k), onde permanecem até sua destinação final (SOUZA et al., 2007).

Figura 2.7 - Processo de geração das CBCA.



Fonte: Adaptado de SOUZA et al. (2007)

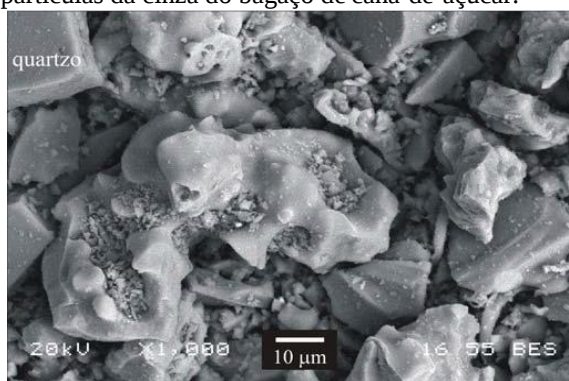
A CBCA é um material pulverulento que dependendo da temperatura em que foi produzida apresenta diferentes tons de cinza. A temperatura de combustão do bagaço de cana dentro das caldeiras costuma variar de usina para usina e também é influenciada pelo teor de umidade do bagaço utilizado. Normalmente, não há um controle rigoroso das condições de queima, de forma que a temperatura dentro das caldeiras das usinas pode variar de 300°C a 1.000°C. Temperaturas de queima mais baixas produzem CBCA com maior concentração de carbono e tonalidade próxima ao preto e temperaturas mais elevadas produzem CBCA com reduzida concentração de carbono e com tonalidade clara.

Além da temperatura de queima ainda há outros fatores que influenciam as características físicas e químicas da CBCA: espécie botânica da cana utilizada, tipo do solo em que foi plantada, condições climáticas, processo de colheita e moagem, safra e região do país em que foi produzida. Contudo, toda CBCA, independente do seu processo de produção, apresenta elevada porosidade e é composta por uma grande quantidade de SiO_2 , que pode chegar a 98% da massa da CBCA e pequenas proporções de FeO_3 , AlO_3 e outros óxidos.

A cinza do bagaço apresenta, em termos de óxidos, uma grande quantidade de dióxido de silício, normalmente acima de 60% (em massa). O silício é absorvido do solo pelas raízes na forma de ácido monossílico (H_4SiO_4) e, após a saída da água das plantas por transpiração, deposita-se na parede externa das células da epiderme como sílica gel. O acúmulo de silício entre a cutícula e a parede das células da epiderme funciona como uma barreira física à penetração de fungos patogênicos e reduz as perdas de água por transpiração (BARBOZA FILHO; PRABHU apud CORDEIRO, 2006, p. 50).

Segundo Cordeiro (2006), outra possível fonte de sílica para a cinza é a areia (quartzo), oriunda da lavoura. Esta areia pode não ter sido completamente retirada da cana após seu processo de lavagem que antecede a moagem. A água utilizada na lavagem da cana proveniente da lavoura é reaproveitada para limpar a caldeira, fazendo com que areia se misture à CBCA produzida. Na Figura 2.8, obtida por microscopia eletrônica de varredura, observa-se a morfologia das partículas da cinza do bagaço com uma estrutura celular altamente porosa e a presença de partículas de quartzo (areia).

Figura 2.8 - Morfologia das partículas da cinza do bagaço de cana-de-açúcar.



Fonte: CORDEIRO, 2006, ap. 50.

Segundo Caldas et al. (2000) e Cordeiro (2006), a CBCA tem características físico-químicas que se assemelham bastante à cinza da casca de arroz, resíduo industrial já empregado como adição pozolânica. Sua reduzida granulometria, sua elevada porosidade e principalmente sua composição química com a preponderância de silicatos e aluminatos lhe confere um enorme potencial para ser incorporado ao cimento Portland como adição. Na Tabela 2.2, consta a

comparação da composição química determinada por fluorescência de raios X de cinzas da casca de arroz e do bagaço de cana-de-açúcar.

Tabela 2.2 – Comparação dos elementos químicos presentes na cinza de casca de arroz e na cinza do bagaço de cana-de-açúcar

Composto	Cinza da casca de arroz	Cinzas do bagaço de cana-de-açúcar		
	(MARTIRENA HERNÁNDEZ <i>et al.</i> , 1998)	(MARTIRENA HERNÁNDEZ <i>et al.</i> , 1998)	(MASSAZZA, 1998)	(SINGH <i>et al.</i> , 2000)
SiO ₂	71,7	72,7	75,0	63,2
Al ₂ O ₃	5,6	5,3	6,7	9,7
Fe ₂ O ₃	3,5	3,9	6,3	5,4
TiO ₂	0,4	0,3	–	–
CaO	10,4	8,0	2,8	3,1
MgO	2,0	2,9	1,1	2,9
SO ₃	0,5	0,1	–	2,9
K ₂ O	3,6	3,5	2,4	–
Na ₂ O	0,4	0,8	1,1	–
P ₂ O ₅	0,9	1,6	4,0	–
Perda ao fogo	0,8	0,8	0,9	6,9

Fonte: CORDEIRO, 2006, p.51

Entretanto, as altas concentrações de SiO₂ que a CBCA possui não garante que ela vai reagir com a Portlandita (CH) presente no cimento *Portland* para formar Silicato de cálcio hidratado (C-S-H). Como já foi mencionado anteriormente, tão importante, para as pozolanas, quanto à alta concentração de silicatos é a reatividade do mesmo. Quando o SiO₂ é levado a altas temperatura se cristaliza deixando de ser reativo. Como nas usinas não há um controle da temperatura de queima do bagaço de cana, a CBCA tanto pode ter silicatos amorfos quanto cristalinos, deforma que, ainda são necessários muitos estudos para viabilizar sua utilização como adição pozolânica, uma vez que essa temática ainda foi pouco abordada.

Para aumentar a reatividade a CBCA há vários caminhos, o principal deles é controlar a temperatura de queima do bagaço de forma a garantir que a sílica permaneça no estado amorfo e que o carbono presente no material orgânico seja liberado em forma de gás. O carbono que permanece na CBCA após a queima é uma impureza que confere à cinza tom escuro e reduzida reatividade. Altas temperaturas permitem que a maior parte do CO₂ seja eliminando, em contra partida, favorecem que o SiO₂ se converta ao estado cristalino.

A temperatura de queima do bagaço pode ser controlada pelo usineiro, para melhorar a reatividade das cinzas que saem das caldeiras. Outra possibilidade é dar tratamento térmico a CBCA oriunda das usinas através de sua calcinação em estufa com patamares de temperatura

determinados. A grande dificuldade em ambos os casos é se determinar o tempo e a temperatura de queima ideal para liberar o carbono e manter a sílica amorfa.

Na tentativa de se chegar a esses valores Cordeiro, Toledo e Fairbairn (2010) queimaram em laboratório o próprio bagaço de cana para produzir diferentes amostras de CBCA com diferentes tratamentos térmicos. Após análise do índice de atividade pozolânica das amostras, conforme a NBR 12653:1992, e a formação de estruturas cristalinas através da Difração de raios X estes pesquisadores chegaram ao seguinte resultado: a CBCA produzida a 600°C é um material pozolânico; já a CBCA produzida a 400°C, apesar de possuir SiO₂ reativa, apresenta reduzida reatividade em razão do seu elevado teor de carbono (85% da massa); e a CBCA calcinada a 800°C apresenta sílica na forma cristalina (Cristobalita).

Há estudos, como o de WEBER (2001) já realizado com a cinza da casca de arroz que defendem o resfriamento rápido, choque térmico, como uma solução para manter a sílica amorfa após ser calcinada em altas temperaturas. A brusca mudança de temperatura dificulta a formação de estruturas cristalinas, podendo esta ser um tratamento térmico também adotado para melhorar a reatividade da sílica presente tanto na cinza da casca de arroz quanto da cinza do bagaço de cana.

Outra forma de melhorar a reatividade de CBCA é através de tratamentos físicos, em especial a moagem. Quanto mais fina for a CBCA mais reativa ela vai ser, pois haverá maior área de contato da cinza com a pasta de cimento gerando grande número de pontos de nucleação para a reação pozolânica. Outra vantagem da redução do tamanho das partículas da cinza é o efeito fíler já comentado anteriormente.

Freitas (2005) analisou a resistência mecânica de argamassas produzidas com amostras de CBCA com diferentes tempos de moagem, de 30min, 1h, 2h, 3h e 4h. No final da pesquisa ele concluiu que as alterações granulométricas pelos diversos tempos de moagem produziram diferenças significativas nas resistências mecânicas das argamassas. A argamassa produzida com a CBCA moída por 4h apresentou melhores resultados devido a maior reatividade pozolânica dessa amostra e também em razão do efeito fíler ocasionado pelo quartzo moído.

Além dos tratamentos térmicos e físicos, mais usuais, ainda é possível realizar tratamentos químicos para aumentar a reatividade da sílica presente na CBCA. Contudo, não foi encontrado nenhuma bibliografia que tratedesse último tipo de tratamento. Ainda, há muito a ser estudado quanto ao beneficiamento da CBCA para seu uso como adição pozolânica. Alguns autores, inclusive, descartam a possibilidade do uso da CBC como adição pozolânica, alegando se tratar de um material inerte. O fato é que a escassa bibliografia sobre essa temática não apresenta dados conclusivos.

No Brasil, as pesquisas sobre este tema só começaram a surgir mais recentemente, havendo trabalhos publicados a partir de ano de 2000. Alguns autores se dedicaram a análise de amostras da CBCA na forma natural, apenas com peneiramento e moagem, outros aplicaram tratamentos térmicos em amostras provenientes de usinas e há ainda aqueles que, a partir do bagaço de cana, produziram em laboratório a cinza com temperaturas de queima controlada. Os resultados encontrados por estes autores são tão diversos quanto às metodologias adotadas. Caldas (2000) realizou ensaios mecânicos com argamassas no traço 1:3 (cimento, areia) com cimento CP-II F32 e areia lavada de rio, com módulo de finura 1,76 (NBR 7217:1987). Antes dos ensaios foi empregada cura úmida por 7 dias e depois no laboratório a 27°C e umidade em torno de 80%. Os corpos de prova foram rompidos a 28, 56 e 112 dias. A cinza utilizada foi coletada dos fornos das usinas e passaram apenas por peneiramento. Os teores de cinza empregados foram 0%, 1%, 3%, 5%, 10% em adição ao cimento. Ao final da pesquisa ele conclui que o melhoramento nas condições de queima do bagaço da cana-de-açúcar poderia resultar em uma cinza com características melhores (CALDAS et al., 2000).

Paula (2006) estudou amostras de CBCA produzidas em laboratório com duas queimas: a primeira por 6h a 600°C e a segunda por 3h a 700°C, ambas em mufla. Posteriormente, a cinza passou 11h de moagem para homogeneizar sua granulometria e aumentar sua superfície específica e reatividade. Os resultados obtidos por Paula para os índices de atividade pozolânica, comprovam a pozolanicidade da CBCA. Isso acontece porque os valores dos índices de atividade pozolânica obtidos são maiores que o estabelecido pela NBR 5752:1992. Paula (2006) realizou vários experimentos com a cinza do bagaço da cana-de-açúcar como caracterização física (distribuição, granulometria e área de superfície específica) e caracterização química (difração de raios X e espectroscopia de fluorescência de raios X). Ensaios mecânicos (resistência à compressão, massa específica, índice de vazios, absorção de água por imersão e índice de atividade pozolânica) nas argamassas e ensaio de tempo de pega inicial e final em pastas. Para obter termos de comparação, foram utilizadas argamassas e pastas com porcentagens de 0%, 10%, 20% e 30% de substituição do cimento Portland. Os resultados obtidos demonstraram que a substituição do cimento pelas cinzas de bagaço da cana-de-açúcar pode ocorrer até 20% sem prejuízos da resistência.

Souza (2007) no ano seguinte chegou à mesma conclusão: as argamassas produzidas com até 20% CBCA não apresenta perdas nas propriedades mecânicas de resistência à tração e à compressão. Porém, diferente de Paula, ele utiliza em seus ensaios experimentais cinza coletada em tanques de decantação de uma usina. A amostra passou apenas por secagem em estufa, peneiramento e moagem por um período de 5h. Para ensaios de resistência mecânica,

foram produzidas argamassas com substituições do cimento por CBCA e corpos de prova para as idades de 3, 7, 21 e 28 dias.

Os pesquisadores Cordeiro, Toledo Filho e Fairbairn (2009a), já mencionados anteriormente, concluíram que a cinza do bagaço de cana-de-açúcar tem potencial para a produção de pozolana. Contudo, recomendam que esta seja produzida com queima controlada a 600°C em forno resistivo, e moída em moinho planetário. Tal processo de produção da cinza visa garantir sua reatividade como adição pozolânica.

As amostras de CBCA utilizadas por estes autores foram obtida a partir do bagaço que depois de coletado da usina foi lavado com água destilada e seco em estufa a 80°C por 48h. Em seguida, foi queimado em mufla. A queima foi adotada em dois patamares, temperatura de 350°C no 1o patamar; temperatura entre 400 e 900°C no 2o patamar, com variação de 100°C; taxa de aquecimento de 10°C/min; e tempo de residência em cada patamar de 3 h. Após a queima, as amostras foram submetidas à cominuição. Para confecção das argamassas, foi empregado cimento Portland sem adição mineral e areia de rio normalizada. Foram realizados experimentos de perda ao fogo, atividade pozolânica, análise de difração de raios X, análise por ressonância magnética nuclear, caracterização morfológica, ensaios térmicos (análise térmica diferencial e termogravimetria) e fluorescência de raios X para determinar a composição química (CORDEIRO, TOLEDO FILHO e FAIRBAIRN, 2009a).

Já as amostras de CBCA analisadas por Nunes et al. (2008) e Zardoet al. (2004), encontravam-se na forma de cristais e possuíam baixa área superficial, apresentando assim, baixa atividade pozolânica. Devido a estes resultados, Nunes e Zardo defendem o emprego da cinza apenas como enchimento em compósitos de cimento Portland curados ao ar.

Nunes et al. (2008) após a obtenção das amostras da cinza do bagaço da cana-de-açúcar, secou-as à sombra por dois dias. Após passar pela peneira com abertura de 0,595mm, foram realizados experimentos para a obtenção da massa específica (picnômetro), granulometria (sedimentação), teor de umidade e matéria orgânica, atividade pozolânica (método de Chapelle Modificado), determinação mineralógica (difração de raios X). O traço de referência foi 1 : 2,06 : 2,94 : 0,555. Foram utilizados os seguintes percentuais de substituição em massa de cimento: 3%, 5%, 7%, 10%, 13%, 15% e 20%, nas idades de 3, 7, 14 e 28 dias.

Nos estudos de Zardoet al. (2004), a cinza retirada diretamente das caldeiras foi moída por 1,5h e 3h. Para determinação do teor de óxidos, foi feito um ensaio de espectroscopia de raios X por energia dispersiva contra uma amostra padrão. Para determinar a atividade pozolânica, uma mistura de 1g de óxido de cálcio e 1g da cinza foram colocadas em ebulição durante 16h; o resultado é expresso pela quantidade em miligramas de óxido de cálcio consumido por

grama do material ensaiado. Outros experimentos também foram realizados, como difração de raios-X (DRX) e determinação da área superficial específica pelo método de BET após moagem em moinho com cargas esféricas de zircônia pelo período de 48 h.

Diante das metodologias e resultados apresentados por estes diferentes autores citados é notório a importância do processo de queima do bagaço de cana para a obtenção de uma cinza reativa. De uma forma geral, os pesquisadores que utilizaram a CBCA proveniente de usinas apenas com tratamentos físicos, moagem e peneiramento, alegam que a CBCA não possui propriedades pozolânicas e deve ser empregada na produção de argamassas e concretos apenas como agregado. Em contrapartida, os pesquisadores que utilizaram CBCA produzidas em laboratório, com controle das condições de queima, defendem o potencial deste material como adição pozolânica. Contudo, todos os trabalhos citados apresentam aspectos benéficos do uso de cinza de bagaço de cana-de-açúcar, seja explicado pelo efeito pozolânico ou pelo efeito fíler.

3. PROGRAMA EXPERIMENTAL

DEFINIÇÃO DO PROGRAMA EXPERIMENTAL

Este programa experimental foi elaborado com o objetivo de caracterizar o comportamento da atividade pozolânica da cinza do bagaço de cana-de-açúcar (CBCA) por meio da utilização de métodos físicos previstos na normatização brasileira e, também, utilizando algumas modificações nos mesmos. Os ensaios para determinação da atividade pozolânica utilizando a NBR 5751:1992 e NBR 5752:1992 foram definidos como tema central do programa experimental.

Este trabalho está inserido no contexto de um projeto de pesquisa amplo coordenado pelo Prof. Antônio Acácio de Melo Neto da Universidade Federal de Pernambuco (UFPE), o qual aborda questão da mensuração da atividade pozolânica por métodos físicos e químicos, assim como utiliza a CBCA como estudo de caso.

MATERIAIS EMPREGADOS

Tipos de pozolana: CBCA e pozolana de referência

Foram utilizados dois tipos de pozolanas: a cinza do bagaço da cana-de-açúcar (CBCA) e um material pozolânico de referência (MTC). Foi realizado um levantamento preliminar no mercado do Estado de Pernambuco e a pozolana disponível é o metacaulim. Este é um material aluminossilicoso obtido, normalmente, da calcinação, entre 600°C e 900°C, de alguns tipos de argilas, como as caulínicas e os caulins de alta pureza (ISAIA, 2011). As amostras foram doadas pela empresa Caulim do Nordeste S.A. e possuíam cor alaranjada e uma granulometria bastante reduzida. Na Tabela 3.1 consta a análise química realizada por fluorescência de raios X no Departamento de Geologia da UFPE. O resultado demonstra elevadas concentrações de óxidos de silício, alumínio e ferro.

Tabela 3.1- Análise semi-quantitativa por fluorescência de raios-X do metacaulim.

Óxidos	CaO	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O _{3T}	SO ₃	MgO	TiO ₂	Na ₂ O	P ₂ O ₅
%	1,0	49,3	32,9	10,3	0,1	0,3	1,7	0,1	0,2
Óxidos	K ₂ O	SrO	MnO	ZrO ₂	CuO	V ₂ O ₅	PF	Total	
%	1,7	nd	0,1	0,1	nd	nd	1,7	99,8	

Fonte: Produzido pela autora.

A cinza do bagaço de cana-de-açúcar utilizada neste estudo é proveniente de uma usina localizada no interior do estado de Pernambuco. Seu processo de produção passou pelas seguintes etapas: queima do bagaço de cana, em caldeira, para geração da cinza; retirada da cinza da caldeira com a água que foi utilizada para lavagem da cana-de-açúcar; por fim a mistura de água e cinza é depositada em tanques para decantação.

Figura 3.1 - Bagaço da cana-de-açúcar antes do processo de queima



Fonte: Acervo Antônio Acácio de Melo Neto.

Figura 3.2 - Caldeira – Processo de queima do bagaço da cana-de-açúcar



Fonte: Acervo Antônio Acácio de Melo Neto.

A cinza que foi utilizada neste estudo apresenta cor escura e granulometria grosseira. Estas características indicam que sua queima na usina se deu em temperaturas abaixo de 600°C resultando, portanto, em uma cinza com elevado teor de carbono. Para sua homogeneização, ela foi seca em estufa a 100°C por 24h e depois passou pela #2,4mm para retirada de impurezas como restos de folha e galhos. Na Tabela 3.3 consta a análise química realizada por fluorescência de raios X no Departamento de Geologia da UFPE. O resultado demonstra a alta concentração de sílica da amostra, superior a 89% da massa da cinza.

Tabela 3.2 - Análise semi-quantitativa por fluorescência de raios-X dacinza do bagaço da cana-de-açúcar.

Óxidos	MgO	Al ₂ O ₃	SiO ₂	P ₂ O ₅	SO ₃	K ₂ O	CaO	Fe ₂ O ₃	NiO
%	0,3	2,2	89,2	0,7	0,3	2,3	0,7	1,7	Tr
Óxidos	TiO ₂	MnO	Cr ₂ O ₃	PF	Total				
%	0,3	Tr	tr	2,14	100,0				

Fonte: Produzida pela autora.

Cimento Portland de referência

O cimento utilizado foi o CPV-ARI, Cimento Portland de alta resistência inicial que apresenta em sua composição apenas o filer calcário, pois o mesmo não apresenta nenhuma adição pozolânica, fato que dificultaria a análise dos resultados. Por isso, optou-se por um cimento com a adição de filer calcário. Na Tabela 3.3 consta a análise química realizada por fluorescência de raios X no Departamento de Geologia da UFPE.

Tabela 3.3 - Análise semi-quantitativa por fluorescência de raios-X do cimento CPV-ARI.

Óxidos	CaO	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	SO ₃	MgO	TiO ₂	Na ₂ O	P ₂ O ₅
%	74,5	11,2	2,8	4,3	4,4	0,8	0,4	0,1	0,1
Óxidos	K ₂ O	SrO	MnO	ZrO ₂	CuO	V ₂ O ₅	PF	Total	
%	1,0	0,1	0,1	nd	nd	nd	0,3	100,0	

Fonte: Produzida pela autora.

Cal hidratada

A cal hidratada utilizada foi o hidróxido de cálcio p.a. (para análise), optou-se por este tipo de cal por se tratar de um material com elevado grau de pureza (99,99%), o que garante a maior segurança dos resultados obtidos.

Existem críticas ao método adotado na NBR 5751:1992 justamente em função da baixa qualidade da cal hidratada disponível no mercado da construção civil, que contem grande quantidade de impurezas (WEBER, 2001). A cal utilizada passou por análise química através da fluorescência de raio-X.

Tabela 0.2- Análise semi-quantitativa por fluorescência de raios-X da cal hidratada.

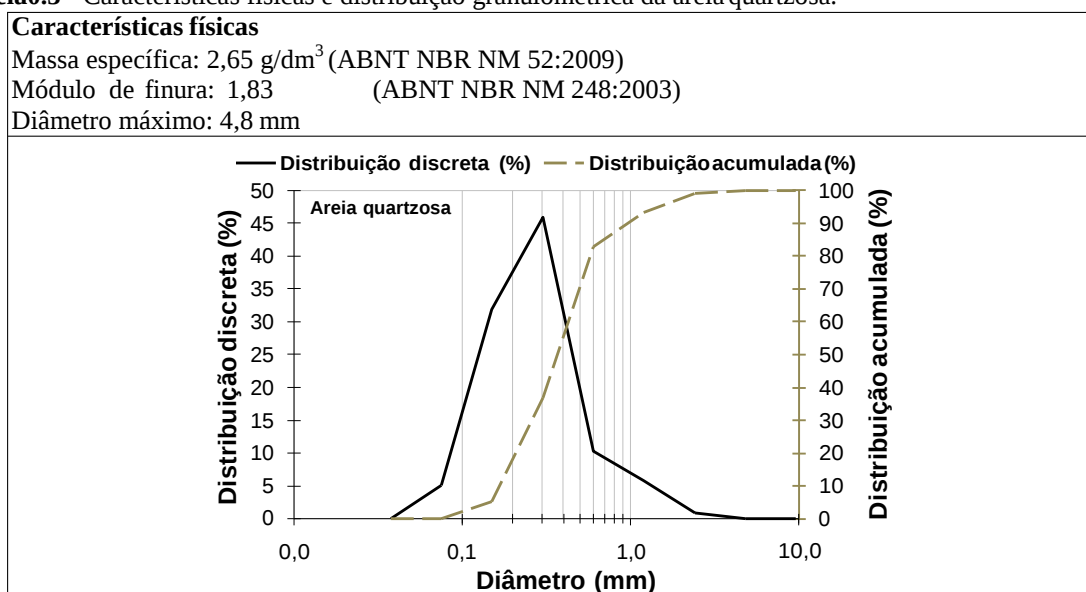
0.2 Análise semi quantitativa por fluorescência de raios X da cal hidratada.									
Óxidos	CaO	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	SO ₃	MgO	TiO ₂	Na ₂ O	P ₂ O ₅
%	75,5	0,2	0,1	0,1	0,3	0,7	nd	Nd	Nd
Óxidos	K ₂ O	SrO	MnO	ZrO ₂	CuO	V ₂ O ₅	PF	Total	
%	0,1	0,2	nd	nd	nd	nd	22,6	99,9	

Fonte: Produzida pela autora.

Areia

No preparo dos corpos-de-prova de argamassa foi utilizada a areia quartzosa, lavada, passada na peneira de abertura de 4,8 mm e a secagem da fração passante em estufa (105°C por 24 horas) e armazenamento para a espera de utilização. As características físicas e a distribuição granulométrica da areia estão apresentadas na Tabela 0.3.

Tabela 0.3 - Características físicas e distribuição granulométrica da areia quartzosa.



Fonte: Acervo Antônio Acácio de Melo Neto.

Aditivos

Nos ensaios da NBR 5752:1992 modificada foi utilizado o aditivo superplastificante ADVATM CAST 585 produzido pela GRACE à base de polycarboloxilatos. Sua incorporação na massa de cimento visa manter a mesma trabalhabilidade e fluidez da mistura mesmo reduzindo a quantidade de água.

PLANEJAMENTO EXPERIMENTAL

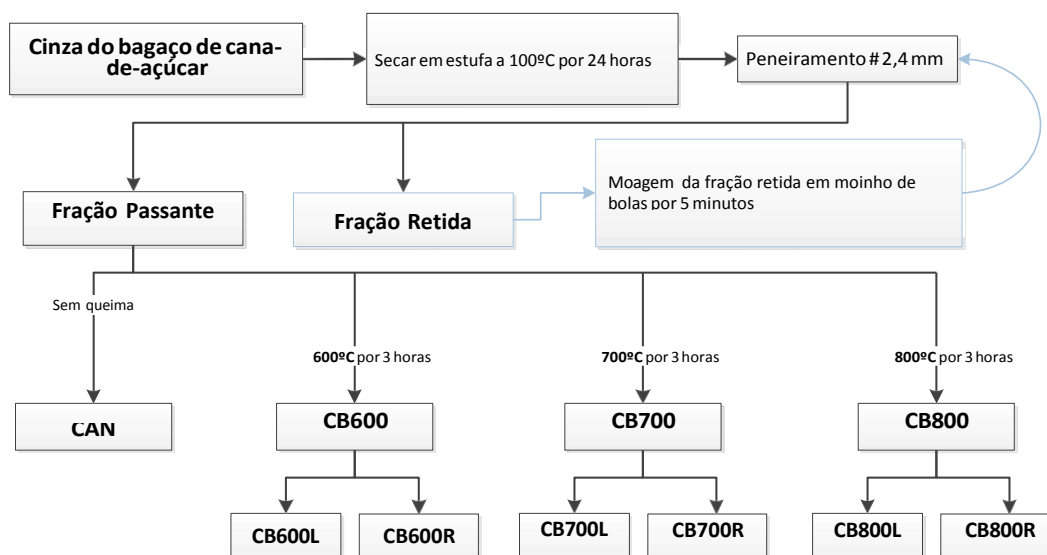
De acordo com a análise sobre a viabilidade dos ensaios aplicáveis, os ensaios mecânicos descritos na NBR 5751:1992 e NBR 5752:1992 apresentam maior disponibilidade e facilidade na execução quando comparado aos demais ensaios. Além destes fatores, o desempenho mecânico é um parâmetro importante na análise do material e do efeito dos tratamentos utilizados no preparo da CBCA.

Tipos de tratamento: moagem e calcinação

O material pozolânico de referência (MTC) não passou por qualquer tipo de tratamento, pois, trata-se de um material adquirido no mercado, portanto, pronto para utilização. Já a CBCA foi preparada para receber os dois tipos de tratamento utilizados neste trabalho: a moagem e a calcinação. Todos os procedimentos adotados no tratamento e preparo da CBCA foram adotados de acordo com o levantamento bibliográfico do tema. A preparação inicial da CBCA consistirá nas seguintes etapas:

- Inicialmente a CBCA foi seca em estufa a 100°C e peneirada na malha de abertura de 4,8 mm para a retirada de materiais contaminantes (pedras, folhas, etc.);
- Material passante foi peneirado na malha de abertura de 2,4 mm, onde a fração retida foi moída em moinho de bolas por 5 minutos, com intuito de apenas desagregar o material grosseiro, e retornou para peneirar na malha de abertura de 2,4 mm;
- O material passante foi dividido em quatro frações e seguiu para os tratamentos previstos. Este material resultante deste preparo inicial foi denominado de cinza do bagaço de cana-de-açúcar “in natura” (CAN) (Figura 3.3)

Figura 3.3 - Esquema do tratamento da CBCA – Tratamento térmico. Onde L = resfriamento lento (temperatura ambiente) e R = resfriamento rápido (brusca imersão em água em temperatura ambiente).



Fonte: Acervo Antônio Acácio de Melo Neto.

A fração passante foi utilizada na aplicação do tratamento térmico em mufla. Foram utilizadas três temperaturas de queima: 600, 700 e 800°C e dois tipos de resfriamento: em temperatura ambiente (Resfriamento lento – L) e em água (Resfriamento rápido – R) (Figura 3.3). Também foi utilizada a CBCA sem tratamento térmico algum para efeito comparativo. O procedimento

adotado na queima foi ligar a mufla e esperar atingir a temperatura escolhida, em seguida a CBCA “in natura” foi colocada para calcinar por três horas. Ao final da calcinação, a CBCA calcinada foi submetida a dois tipos de resfriamento:

- Resfriamento lento (L): ao fim das três horas, a CBCA calcinada foi imediatamente exposta pela abertura da mufla e deixada para resfriar em temperatura ambiente;

- Resfriamento rápido (R): ao fim das três horas, a CBCA calcinada foi imediatamente retirada da mufla e colocada para resfriamento brusco por imersão em água. Este procedimento foi adotado com o intuito de obter uma CBCA com maior grau de amorficidade e, assim, maior reatividade. Após a imersão em água, a CBCA resfriada foi colocada em estufa a 100°C até a sua total secagem.

Outro tratamento utilizado na CBCA foi a moagem, sendo fixadas três variações de área específica (Permeabilímetro de Blaine – NBR NM 76:1998): 300 ± 20 , 400 ± 20 e $500 \pm 20 \text{ m}^2/\text{kg}$. Para este fim, foi utilizado moinho de bolas e o tempo de moagem de cada variação foi determinado para que fossem atingidas as três variações de área específicas definidas. Na Figura 3.3, apresenta-se a sequência geral de preparo da CBCA para ser utilizada no experimento. Definidos todos os tipos de pozolanas e tipos de tratamento, na Tabela 3.6, apresenta-se o quadro resumo das amostras obtidas com os tratamentos previstos.

Figura 3.4 – Sequência geral do preparo da CBCA.



Fonte: Produzido pela autora.

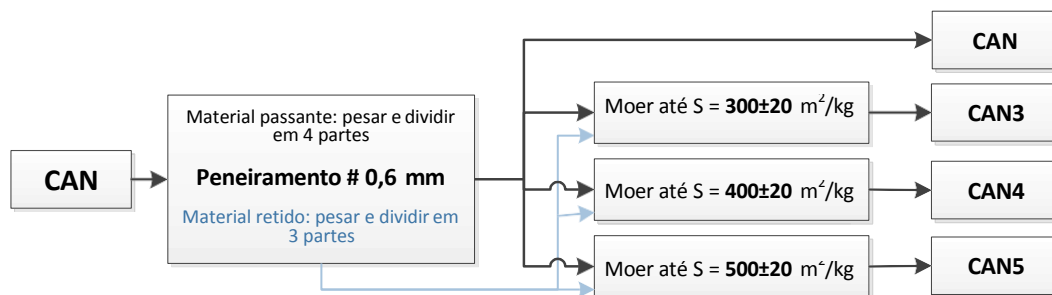
Tabela 3.6 - Quadro resumo das amostras e suas respectivas denominações

Amostras	Descrição
MTC	Metacaulim - material pozolânico de referência, adquirido no mercado
CAN	CBCA “in natura” e sem moer
CAN3	CBCA “in natura” e área específica igual a $300 \pm 20 \text{ m}^2/\text{kg}$
CAN4	CBCA “in natura” e área específica igual a $400 \pm 20 \text{ m}^2/\text{kg}$
CAN5	CBCA “in natura” e área específica igual a $500 \pm 20 \text{ m}^2/\text{kg}$
CB600L	CBCA calcinada a 600°C , resfriada lentae sem moer
CB600R	CBCA calcinada a 600°C , resfriada rápidae sem moer
CB600L3	CBCA calcinada a 600°C , resfriada lentae e área específica igual a $300 \pm 20 \text{ m}^2/\text{kg}$
CB600R3	CBCA calcinada a 600°C , resfriada rápidae e área específica igual a $300 \pm 20 \text{ m}^2/\text{kg}$
CB600L4	CBCA calcinada a 600°C , resfriada lentae e área específica igual a $400 \pm 20 \text{ m}^2/\text{kg}$
CB600R4	CBCA calcinada a 600°C , resfriada rápidae e área específica igual a $400 \pm 20 \text{ m}^2/\text{kg}$
CB600L5	CBCA calcinada a 600°C , resfriada lentae e área específica igual a $500 \pm 20 \text{ m}^2/\text{kg}$
CB600R5	CBCA calcinada a 600°C , resfriada rápidae e área específica igual a $500 \pm 20 \text{ m}^2/\text{kg}$
CB700L	CBCA calcinada a 700°C , resfriada lentae sem moer
CB700R	CBCA calcinada a 700°C , resfriada rápidae sem moer
CB700L3	CBCA calcinada a 700°C , resfriada lentae e área específica igual a $300 \pm 20 \text{ m}^2/\text{kg}$
CB700R3	CBCA calcinada a 700°C , resfriada rápidae e área específica igual a $300 \pm 20 \text{ m}^2/\text{kg}$
CB700L4	CBCA calcinada a 700°C , resfriada lentae e área específica igual a $400 \pm 20 \text{ m}^2/\text{kg}$
CB700R4	CBCA calcinada a 700°C , resfriada rápidae e área específica igual a $400 \pm 20 \text{ m}^2/\text{kg}$
CB700L5	CBCA calcinada a 700°C , resfriada lentae e área específica igual a $500 \pm 20 \text{ m}^2/\text{kg}$
CB700R5	CBCA calcinada a 700°C , resfriada rápidae e área específica igual a $500 \pm 20 \text{ m}^2/\text{kg}$
CB800L	CBCA calcinada a 800°C , resfriada lentae sem moer
CB800R	CBCA calcinada a 800°C , resfriada rápidae sem moer
CB800L3	CBCA calcinada a 800°C , resfriada lentae e área específica igual a $300 \pm 20 \text{ m}^2/\text{kg}$
CB800R3	CBCA calcinada a 800°C , resfriada rápidae e área específica igual a $300 \pm 20 \text{ m}^2/\text{kg}$
CB800L4	CBCA calcinada a 800°C , resfriada lentae e área específica igual a $400 \pm 20 \text{ m}^2/\text{kg}$
CB800R4	CBCA calcinada a 800°C , resfriada rápidae e área específica igual a $400 \pm 20 \text{ m}^2/\text{kg}$
CB800L5	CBCA calcinada a 800°C , resfriada lentae e área específica igual a $500 \pm 20 \text{ m}^2/\text{kg}$
CB800R5	CBCA calcinada a 800°C , resfriada rápidae e área específica igual a $500 \pm 20 \text{ m}^2/\text{kg}$

Fonte: Acervo Antônio Acácio de Melo Neto.

A CBCA “in natura” (CAN) deu origem a quatro amostras com diferentes graus de moagem (Tabela 3.6 e Figura 3.5). Inicialmente, a amostra foi peneirada na malha de abertura de 0,6 mm, onde o material passante foi dividido em 4 partes, sendo uma das partes definida como CAN. Para aproveitar ao máximo a quantidade de CBCA, o material retido na malha de abertura de 0,6 mm foi dividido em 3 partes e adicionado às outras frações anteriores. Cada fração foi submetida à moagem em moinho de bolas pelo tempo necessário para alcançar a área específica definida anteriormente, obtendo-se assim as amostras CAN3, CAN4 e CAN5 (Tabela 3.6 e Figura 3.5).

Figura 0.1 - Esquema do tratamento da CBCA “in natura” (CAN) – Tratamento físico - Moagem.

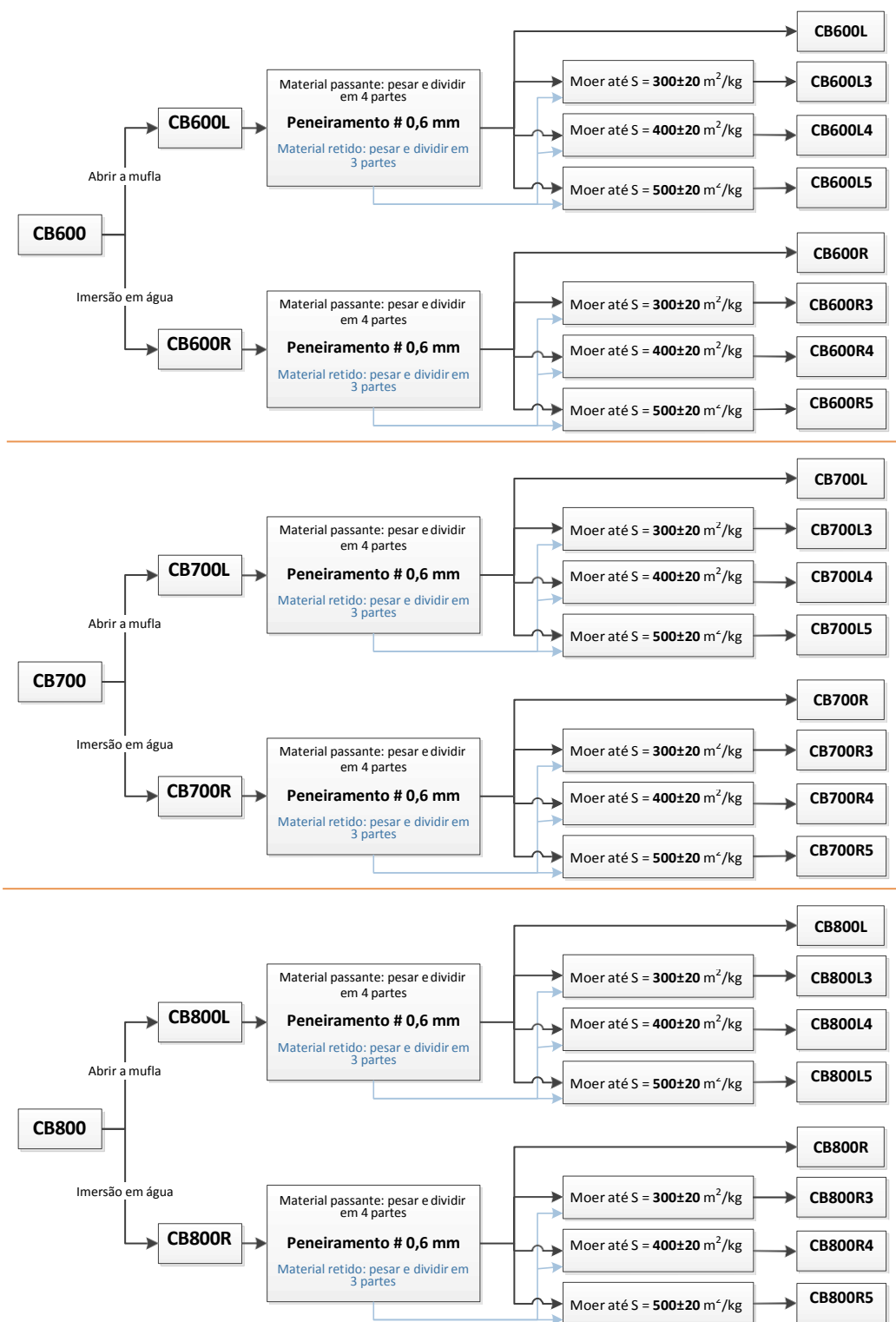


Fonte: Acervo Antônio Acácio de Melo Neto.

As amostras oriundas do tratamento térmico (Figura 3.3 e Tabela 3.6) também foram submetidas ao processo de moagem, de modo a se obter um programa experimental completo para a análise do efeito da moagem e calcinação na atividade pozolânica da CBCA. O processo de moagem foi o mesmo para as CBCA calcinadas a 600, 700, e 800°C e resfriadas de modo lento e rápido (Figura 3.6 e Tabela 3.6).

Exemplificando, parte da CBCA calcinada a 600°C foi resfriada de forma brusca por imersão em água e, em seguida, foi colocada em estufa para a secagem. Em seguida, a amostra foi peneirada na malha de abertura de 0,6 mm, onde o material passante foi dividido em 4 partes, sendo uma das partes definida como CB600R. Para aproveitar ao máximo a quantidade de CBCA, o material retido na malha de abertura de 0,6 mm foi dividido em 3 partes e adicionado às outras frações anteriores. Cada fração foi submetida à moagem em moinho de bolas pelo tempo necessário para alcançar a área específica definida anteriormente, obtendo-se assim as amostras CB600R3, CB600R4 e CB600R5 (Tabela 3.6 e Figura 3.6). Este mesmo procedimento foi utilizado nas demais amostras, todo o planejamento das amostras calcinadas pode ser visualizado na Figura 3.6. Ao fim desta etapa de preparo das amostras, tem-se um total de 29 tipos de amostras que foram caracterizadas e submetidas os ensaios previstos, conforme será descrito posteriormente.

Figura 3.6 - Esquema do tratamento da CBCA calcinada a 600, 700 e 800°C – Tratamento físico - Moagem.



Fonte: Acervo Antônio Acácio de Melo Neto.

PROCEDIMENTOS DE ENSAIO

Caracterização química e física das amostras

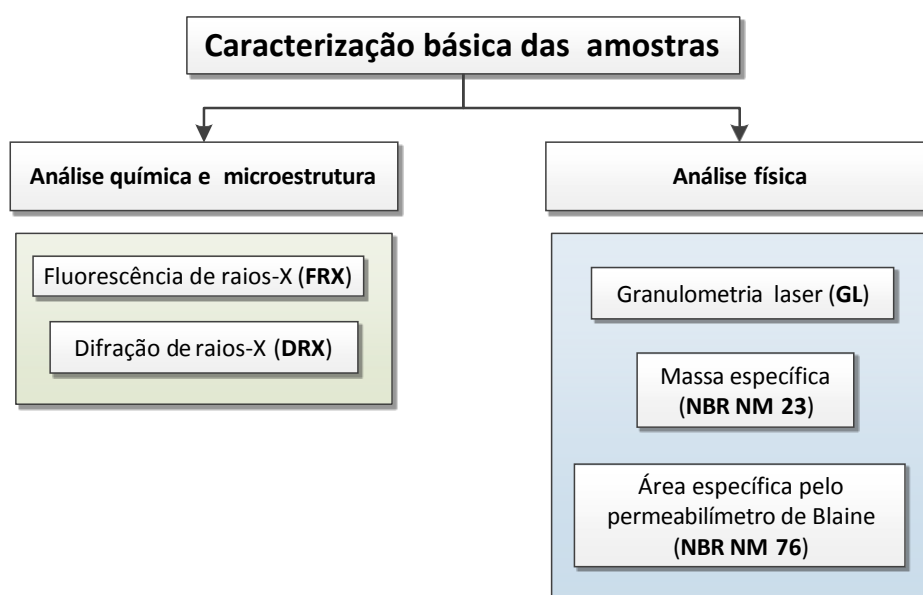
As amostras foram caracterizadas do ponto de vista químico e microestrutural utilizando diversas técnicas (Figura 3.7), destacando-se:

- Difração (DRX) e fluorescência (FRX) de raios-X;

A maior parte desta caracterização foi realizada nas amostras na forma de pó e de acordo com instruções do técnico responsável e do conhecimento levantado na revisão bibliográfica das técnicas em questão. A maior parte das determinações foi realizada em parceria com o Centro de Tecnologias Estratégicas do Nordeste – CETENE. Porém, em razão de dificuldades na disponibilidade de equipamentos e datas, não foi possível realizar a caracterização de todas as amostras previstas no planejamento experimental (Tabela 3.6, pág. 33). A caracterização do ponto de vista físico utilizou diversas técnicas (Figura 3.7), sendo realizada na UFPE/CAA e no CETENE. Destacam-se as seguintes determinações:

- Área específica pelo permeabilímetro de Blaine e por granulometria laser (GL);
- Distribuição granulométrica por granulometria laser (GL);
- Massa específica no frasco volumétrico de Le Chatelier.

Figura 3.7 - Esquema das determinações para a caracterização básica das amostras.



Fonte: Acervo Antônio Acácio de Melo Neto.

ABNT NBR 5752:1992 e NBR572 Modificada

A NBR 5752:1992 preconiza a determinação da atividade pozolânica com cimento Portland baseada na relação entre a resistência à compressão da argamassa com o material pozolânico mais cimento Portland e a resistência à compressão da argamassa de referência utilizando apenas o cimento Portland. Esta relação é denominada de índice de atividade pozolânica com cimento Portland e é expressa segundo a equação 3.1.

$$IAP = \frac{R_{cP}}{R_{cR}} \times 100 \quad \text{Equação 3,1}$$

Onde:

IAP é o índice de atividade pozolânica com cimento Portland, expresso em porcentagem (%);

R_{cP} é a resistência à compressão, aos 28 dias, dos corpos-de-prova moldados com cimento e material pozolânico, expressa em megapascals (MPa);

R_{cR} é a resistência à compressão, aos 28 dias, dos corpos-de-prova moldados só com cimento, expressa em megapascals (MPa).

Para a determinação do IAP, a NBR 5752:1992 estabelece uma série de procedimentos no preparo das argamassas e dos corpos-de-prova, destacam-se:

- A argamassa de referência (Arg_{ref}) deve ter apenas cimento Portland;
- A argamassa de pozolana mais cimento Portland (Arg_{poz}) deve conter 35% do seu volume absoluto de cimento Portland substituído por material pozolânico;
- Os corpos-de-prova, após a desforma, devem ser colocados em ambiente com 100% de umidade relativa e temperatura de $(23 \pm 2) ^\circ\text{C}$ durante (24 ± 2) horas;
- Em seguida, os corpos-de-prova devem ser acondicionados em recipientes hermeticamente fechados e estanques em uma temperatura de $(38 \pm 2) ^\circ\text{C}$, durante 27 dias.

A NBR 5752:1992 estabelece outro critério importante e que interfere diretamente nas críticas ao método realizada por vários autores (GAVA, 1999; CORDEIRO, 2006; POUEY, 2006; CORDEIRO, 2009), a quantidade de água requerida. Esta quantidade de água é a necessária para que as argamassas utilizadas atinjam o índice de consistência normal de (225 ± 5) mm.

Esta fixação da consistência como parâmetro de dosagem das misturas, geralmente, incorrem diferentes relações água/aglomerante nas misturas ensaiadas. Como é consensual, a resistência mecânica está diretamente relacionada com a relação água/aglomerante, portanto, a sua variação pode influenciar mais do que a possível atividade pozolânica. A quantidade de água requerida é expressa pela equação:

$$A_{\text{req}} = \frac{A_{\text{arg}}}{A_{\text{ref}}} \times 100 \quad \text{Equação 3.2}$$

Onde:

A_{req} é água requerida, expressa em porcentagem (%);

A_{arg} e A_{ref} são as quantidades de água necessárias para a obtenção de índices de consistência normais de (225 ± 5) mm para as argamassas A_{arg} e A_{ref} , respectivamente, expressas em gramas (g).

Para a substituição de 35% do volume absoluto do cimento Portland pelo material pozolânico é necessária a determinação da massa específica de ambos, sendo esta determinada conforme a NBR NM 23:2001. Esta norma preconiza a determinação da massa específica utilizando o frasco volumétrico de Le Chatelier. Seguindo a NBR 5752:1992, as argamassas foram preparadas com proporção em massa igual de 1:3 (aglomerante: areia), onde o aglomerante corresponde a soma da massa de cimento mais a massa de material pozolânico.

De acordo com as críticas levantadas na revisão bibliográfica e utilizando o método proposto por Gava (1999), optou-se por também utilizar uma modificação do método descrito na NBR 5752:1992 para minimizar o efeito da relação água/aglomerante no método original. Esta modificação foi realizada com a fixação da quantidade de água aplicada para todas as misturas. Em todos os traços se colocou a quantidade de água obtida para se chegar a consistência normal (225 ± 5) mm na argamassa de referência e para garantir a mesma consistência nos traços com adição pozolânica se utilizou aditivo superplastificante. O aditivo foi dosado em relação a massa de aglomerante.

Segundo a NBR 12653 (1992), a qual estabelece os requisitos para os materiais pozolânicos, para a que estejam em conformidade os materiais pozolânicos devem apresentar um IAP maior ou igual a 75% e uma quantidade de água requerida menor ou igual a 110%. A NBR 5752:1992 estabelece que para a determinação do IAP devem ser confeccionados 3 corpos-de-prova, porém, neste trabalho foram confeccionados 6 corpos-de-prova para a maior confiabilidade dos resultados.

3.4.3 ABNT NBR 5751:1992

A NBR 5751:1992 preconiza a determinação de atividade pozolânica em materiais pozolânicos através do índice de atividade com cal (IAC). O IAC é a resistência à compressão de argamassas confeccionadas com cal hidratada e o material pozolânico e, segundo a NBR 12653:1992, para que esteja em conformidade deve apresentar um resultado maior ou igual a 6MPa.

No Brasil, a principal crítica a este método está na utilização da cal hidratada, pois, em razão da baixa qualidade dos cales nacionais, é difícil encontrar uma cal que atenda aos requisitos da norma. Neste trabalho, optou-se por utilizar cal hidratada p.a. (99,99% de pureza) para solucionar a dificuldade de encontrar cales nacionais que atendessem os critérios da NBR 5751:1992.

Para a determinação do IAC, a NBR 5751:1992 estabelece uma série de procedimentos no preparo das argamassas e dos corpos-de-prova, destacam-se:

- A argamassa deve conter uma parte, em massa, de hidróxido de cálcio e mais uma quantidade de material pozolânico, que corresponda ao dobro do volume do hidróxido de cálcio;
- A quantidade de água para a mistura deve corresponder a um índice de consistência de (225 ± 5) mm obtido no ensaio de abatimento, conforme prescreve a NBR 7215:1996;
- A cura dos corpos-de-prova é realizada nos próprios moldes vedados durante 7 dias, sendo colocados em ambiente com 100% de umidade relativa e temperatura de $(23 \pm 2)^{\circ}\text{C}$ durante (24 ± 2) horas e, em seguida, acondicionados em uma temperatura de $(55 \pm 2)^{\circ}\text{C}$, durante 6 dias. Assim como na NBR 5752:1992, havia a possibilidade da variação da água/aglomerante para a fixação do índice de consistência de (225 ± 5) mm. Porém, a modificação com uso de superplastificantes, não foi utilizada, pois são aditivos desenvolvidos para cimento Portland. Neste trabalho, em razão da quantidade limitada de material, optou-se por não fazer esta modificação na NBR 5751:1992, porém, é sugerido que se faça este teste em trabalhos futuros.

A NBR 5751:1992 estabelece que para a determinação do IAC devem ser confeccionados 3 corpos-de-prova, porém, neste trabalho foram confeccionados 6 corpos-de-prova para a maior confiabilidade dos resultados.

4. ANÁLISE DOS RESULTADOS

TRATAMENTOS DA CBCA

Neste item serão abordados os efeitos dos tratamentos utilizados na CBCA nas propriedades que possivelmente mais influenciam na questão da pozolanicidade, como área específica e a amorficidade por difração de raios-X. Na Tabela 4.1 consta o quadro resumo das principais propriedades físicas avaliadas neste trabalho.

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

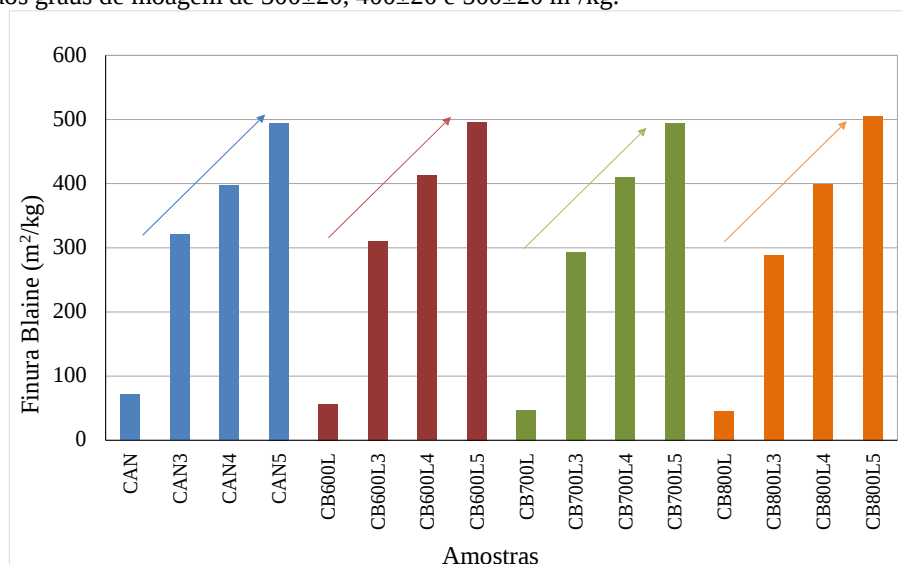
Amostra	Massa específica (g/cm ³)	Finura Blaine m ² /kg	Área específica (gran.laser) m ² /kg	Área específica (BET) m ² /kg
CAN	2,61	71,06	41,04	41,04
CAN3	2,66	320,72	323,38	323,38
CAN4	2,62	397,59	412,66	412,66
CAN5	2,65	494,69	498,68	498,68
CB600L	2,64	56,88	89,25	89,25
CB600L3	2,64	311,19	346,59	346,59
CB600L4	2,65	413,16	448,34	448,34
CB600L5	2,64	496,07	533,50	533,50
CB700L	2,63	47,65	147,35	147,35
CB700L3	2,62	293,30	339,56	339,56
CB700L4	2,70	410,71	398,02	398,02
CB700L5	2,66	494,25	533,45	533,45
CB800L	2,65	45,53	145,75	145,75
CB800L3	2,64	287,60	295,12	295,12
CB800L4	2,64	399,76	411,97	411,97
CB800L5	2,66	505,60	478,60	478,60
MTC	2,57	2245,49	471,88	
Cal P.A.	2,20	982,37	380,44	
CPV ARI	3,15	475,17	482,22	
CB600R	2,61	56,88	39,12	89,25
CB600R3	2,68	312,31	350,72	346,59
CB600R4	2,65	387,62	410,55	448,34
CB600R5	2,67	507,61	498,63	533,50
CB700R	2,61	47,65	68,15	147,35
CB700R3	2,59	291,68	286,06	339,56
CB700R4	2,61	401,28	402,56	398,02
CB700R5	2,62	492,56	464,95	533,45
CB800R	2,61	45,53	147,92	145,75
CB800R3	2,60	310,17	291,71	295,12
CB800R4	2,66	394,03	395,26	411,97
CB800R5	2,62	503,75	521,12	478,60

Fonte: Acervo Antônio Acácio de Melo Neto.

De acordo com os resultados (Figura 4.1 e Figura 4.2) pode-se afirmar que a moagem foi bem sucedida em alcançar os quatro níveis de finura Blaine: sem moer, 300 ± 20 , 400 ± 20 e 500 ± 20 m²/kg. Os resultados de área específica estimada pelo ensaio de granulometria laser (tabela 4.1) também foram obtidos e, de modo geral, apresentaram coerência com a definição

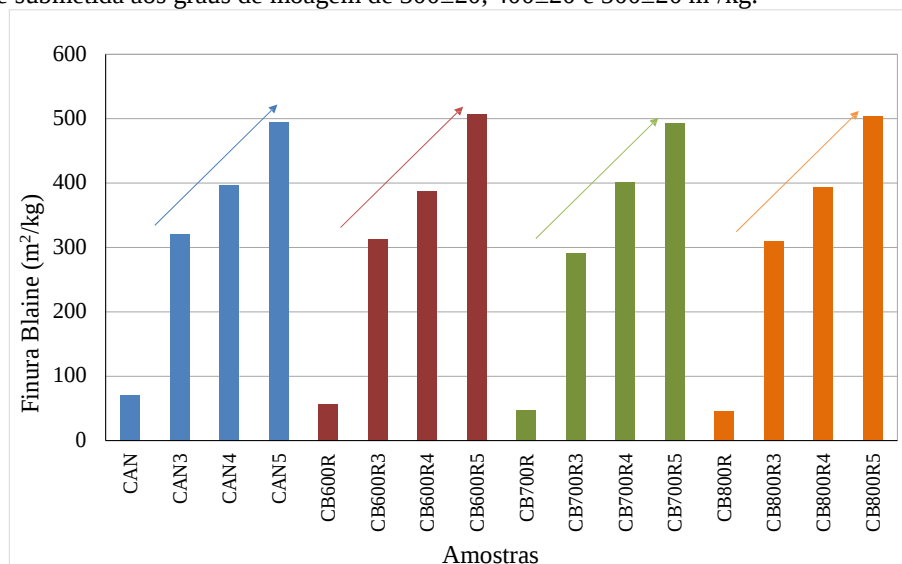
dos níveis estabelecidos. As cinzas que não passaram por moagem apresentaram áreas específicas inferiores a $100 \text{ m}^2/\text{kg}$.

Figura 4.1 – Área específica (Blaine) da CBCA “in natura” e calcinada (600, 700 e 800°C), resfriada lentamente e submetida aos graus de moagem de 300 ± 20 , 400 ± 20 e $500\pm 20 \text{ m}^2/\text{kg}$.



Fonte: Acervo Antônio Acácio de Melo Neto.

Figura 4.2 – Área específica (Blaine) da CBCA “in natura” e calcinada (600, 700 e 800°C), resfriada rapidamente e submetida aos graus de moagem de 300 ± 20 , 400 ± 20 e $500\pm 20 \text{ m}^2/\text{kg}$.

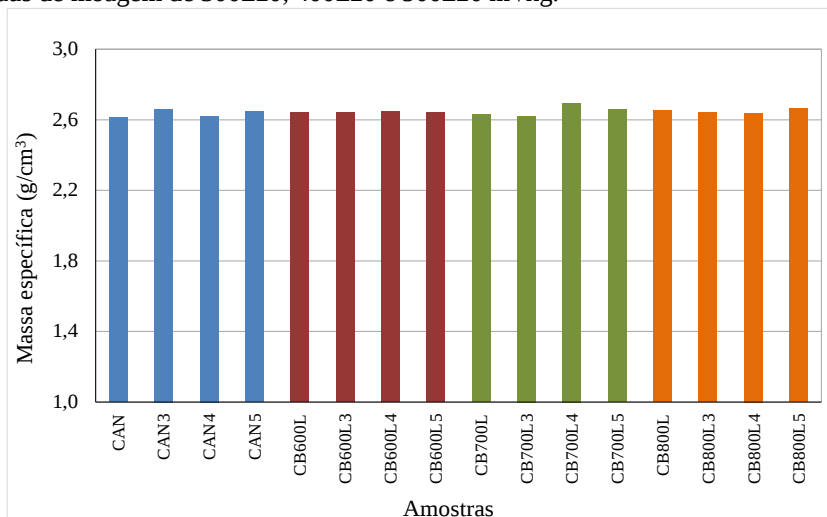


Fonte: Acervo Antônio Acácio de Melo Neto.

Os resultados da massa específica (Figura 4.3 e Figura 4.4) da CBCA, com e sem os tratamentos aplicados, manteve-se com valores em torno de $2,65 \text{ g}/\text{cm}^3$. Estes resultados corroboram para confirmar o quartzo como o principal polimorfismo do silício na constituição da CBCA, conforme constatado na análise química (Tabela 3.2, pág. 29) e na difração de raios – X, pois é consensual que a massa específica do quartzo apresenta o valor de $2,65$

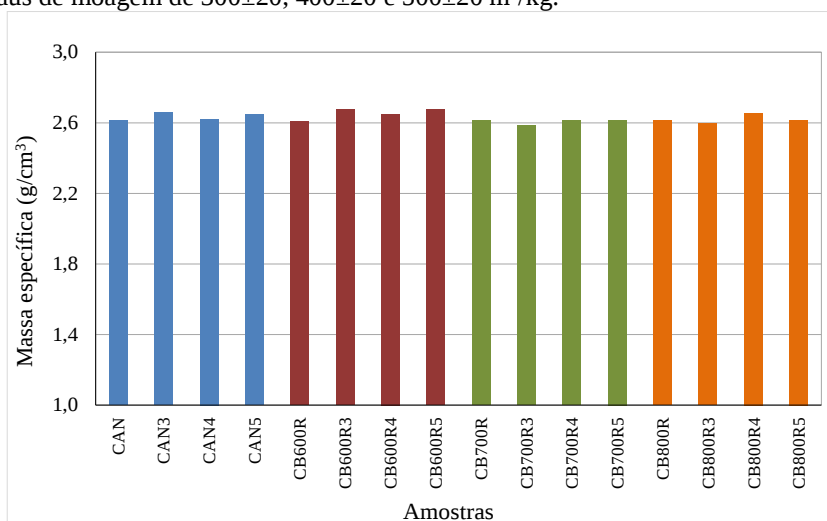
g/cm^3 . Mesmo com a redução do tamanho das partículas através da moagem, as massas específicas dos diferentes tipos de cinza se mantiveram por volta de $2,6\text{g/cm}^3$.

Figura 4.3 – Massa específica da CBCA “in natura” e calcinada (600, 700 e 800°C), resfriada lentamente e submetida aos graus de moagem de 300 ± 20 , 400 ± 20 e $500\pm 20\text{ m}^2/\text{kg}$.



Fonte: Acervo Antônio Acácio de Melo Neto.

Figura 4.4 – Massa específica da CBCA “in natura” e calcinada (600, 700 e 800°C), resfriada rapidamente e submetida aos graus de moagem de 300 ± 20 , 400 ± 20 e $500\pm 20\text{ m}^2/\text{kg}$.

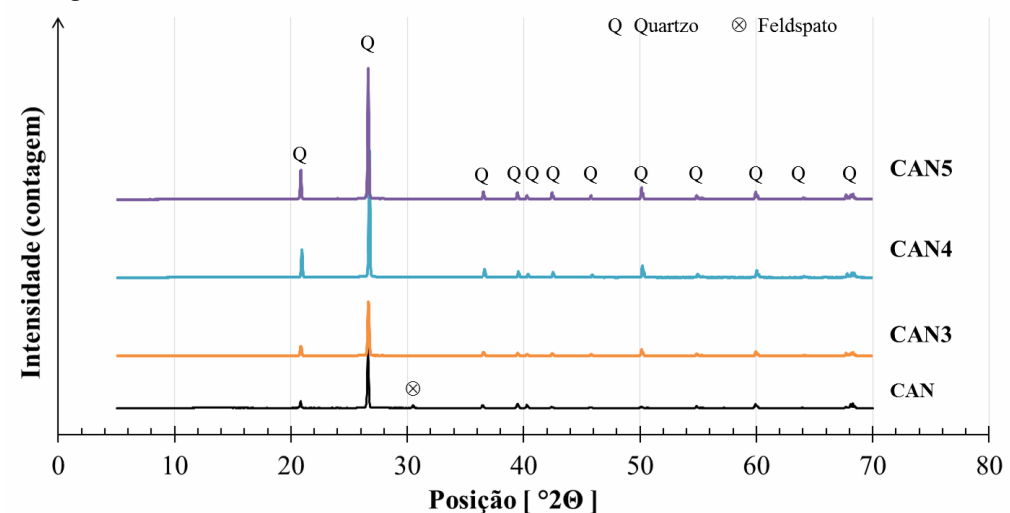


Fonte: Acervo Antônio Acácio de Melo Neto.

Observa-se que o principal elemento identificado pela DRX foi quartzo em todas as amostras ensaiadas (Figura 4.5, Figura 4.6 e Figura 4.8) e com a aplicação do resfriamento lento, sendo característico o seu pico na posição $2\theta = 26,64^\circ$, com elevada intensidade, o que caracteriza a cristalinidade das amostras. De modo geral, a análise da amorficidade utilizando a difração por raios X foi bastante prejudicada pela presença de areia na CBCA, pois, conforme descrito anteriormente, a água utilizada para lavar a cana-de-açúcar é reutilizada para carrear a cinza resultante da queima do bagaço até o tanque de decantação. A elevada intensidade dos picos

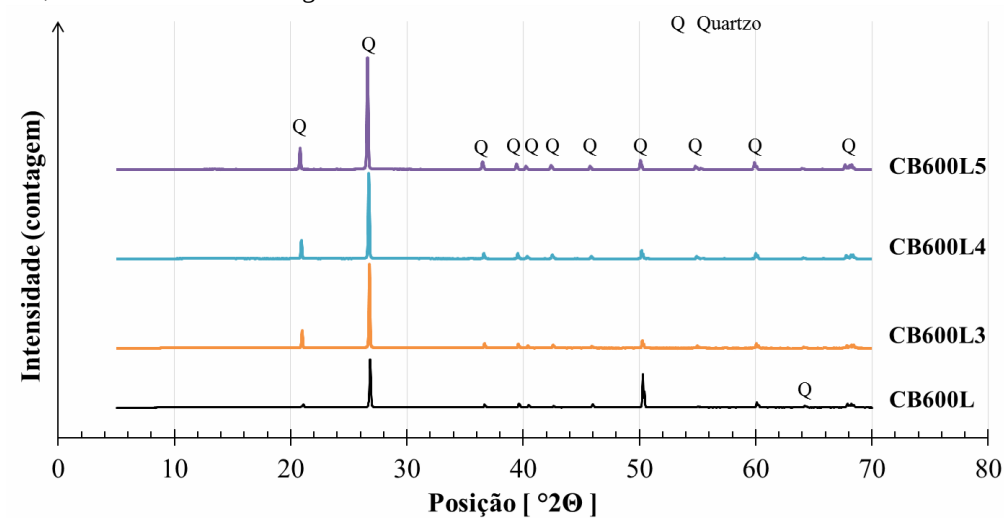
de quartzo da CBCA alterada pela presença da areia, provavelmente, encobriu a presença de um possível halo amorfo nas análises de DRX.

Figura 4.5 – Difração de raios X da CBCA “in natura” e submetida aos graus de moagem de 300 ± 20 , 400 ± 20 e 500 ± 20 m²/kg.



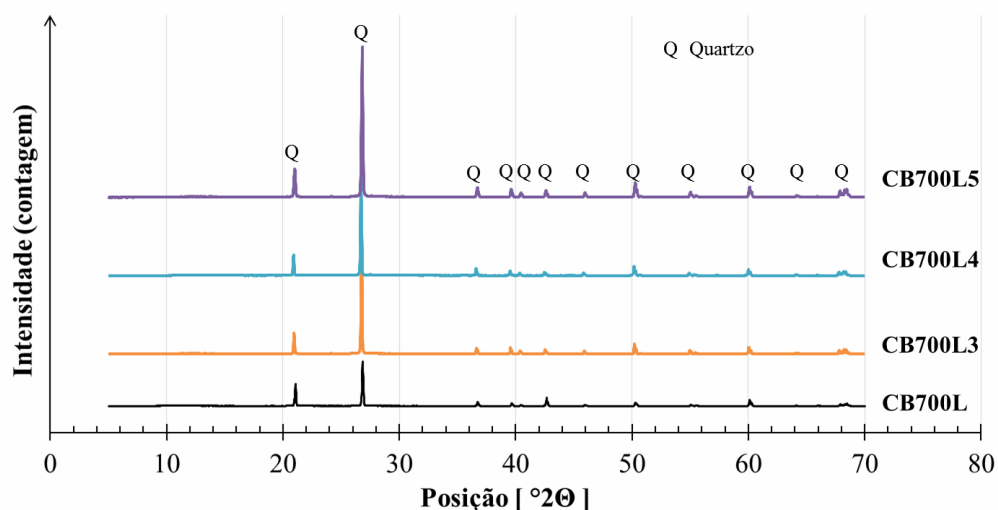
Fonte: Acervo Antônio Acácio de Melo Neto.

Figura 4.6 – Difração de raios X da CBCA calcinada à 600°C, resfriada lentamente e com os graus de moagem de 300 ± 20 , 400 ± 20 e 500 ± 20 m²/kg.



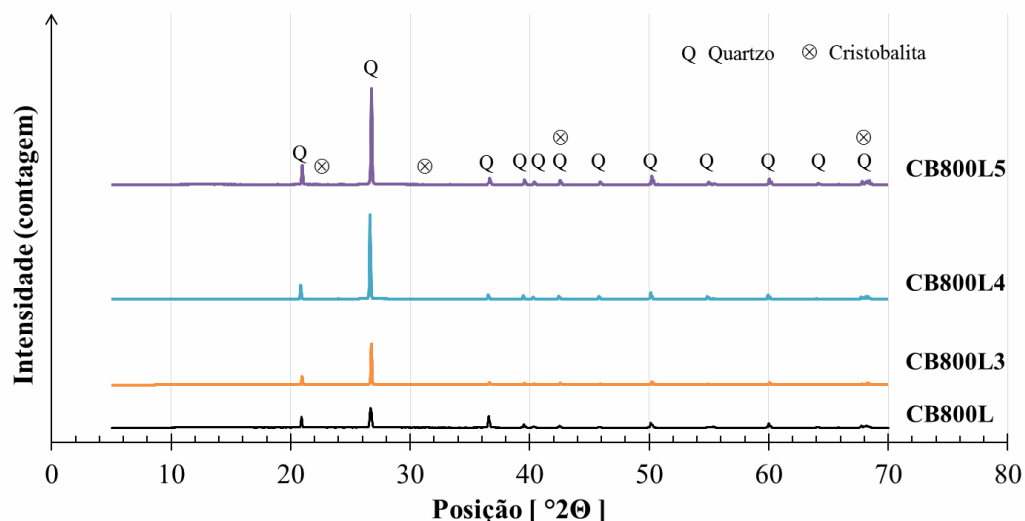
Fonte: Acervo Antônio Acácio de Melo Neto.

Figura 4.7 – Difração de raios X da CBCA calcinada à 700°C, resfriada lentamente e com os graus de moagem de 300 ± 20 , 400 ± 20 e 500 ± 20 m²/kg.



Fonte: Acervo Antônio Acácio de Melo Neto.

Figura 4.8 – Difração de raios X da CBCA calcinada à 800°C, resfriada lentamente e com os graus de moagem de 300 ± 20 , 400 ± 20 e 500 ± 20 m²/kg.

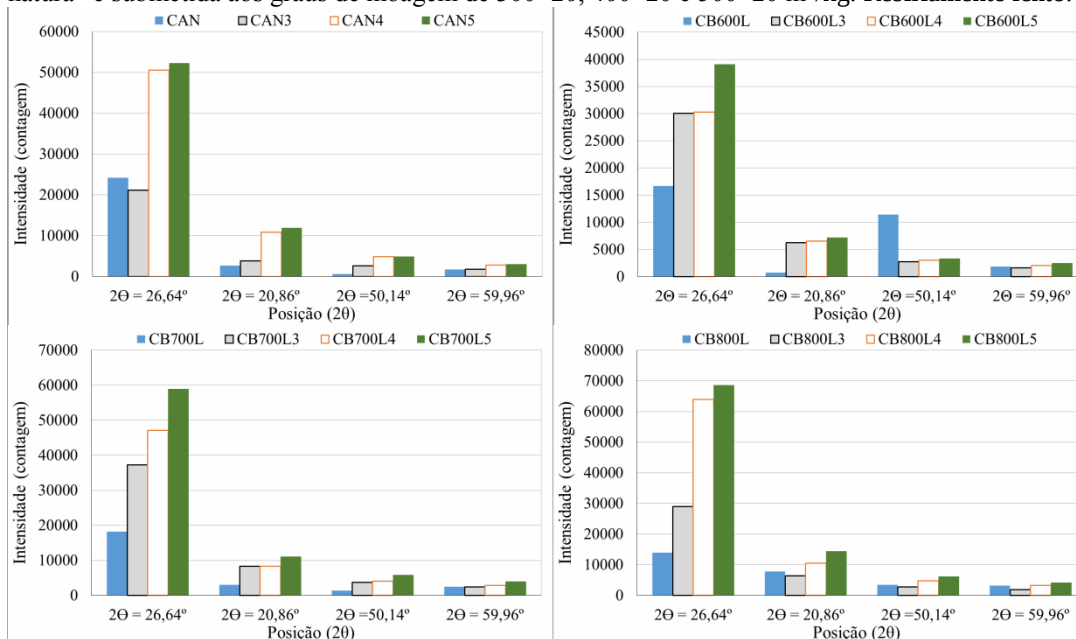


Fonte: Acervo Antônio Acácio de Melo Neto.

Dentre os resultados da DRX da CBCA resfriada lentamente, observa-se na condição de calcinação a 800°C (Figura 4.8) o surgimento de picos relacionados a outro polimorfismo do quartzo que é a cristobalita, geralmente, associada a elevadas temperaturas.

A Figura 4.9 compara de forma isolada intensidade dos quatro picos principais do quartzo $2\theta = 26,64^\circ$, $2\theta = 20,86^\circ$, $2\theta = 50,14^\circ$ e $2\theta = 59,96^\circ$ nas amostras de CBCA “in natura” (CAN) e calcinadas a 600°C, 700°C e 800°C com os diferentes níveis de finura empregado, sendo utilizado o resfriamento lento. Observa-se claramente que a moagem provocou o aumento da intensidade dos picos principais do quartzo, o que poderia levar a conclusão do aumento da cristalinidade e, conseqüentemente, diminuição da amorficidade.

Figura 4.9 – Gráfico comparativo das intensidades (DRX) dos picos principais do quartzo presente naCBCA “in natura” e submetida aos graus de moagem de 300 ± 20 , 400 ± 20 e 500 ± 20 m²/kg. Resfriamento lento.

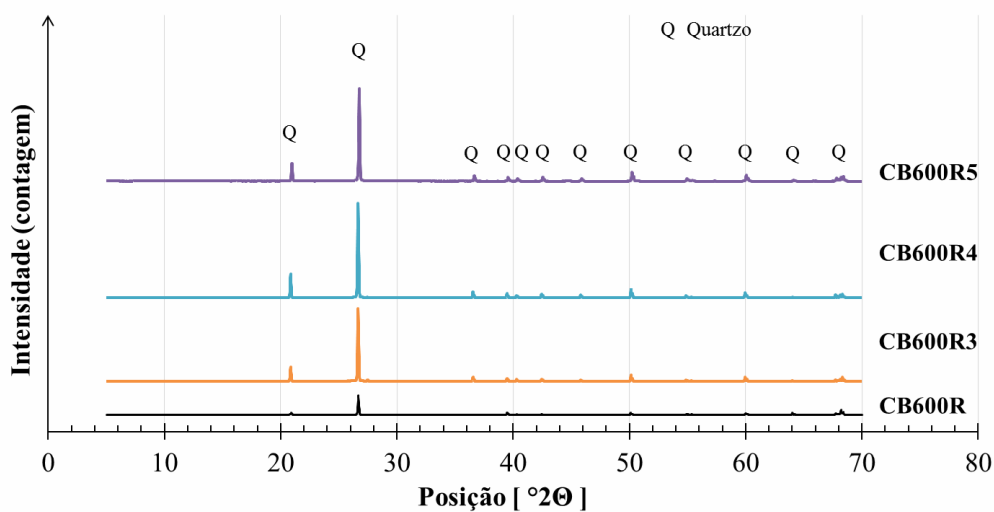


Fonte: Acervo Antônio Acácio de Melo Neto.

Porém, os resultados do índice de pozolanicidade com cal não corroboram para esta conclusão (item 4.4, pág. 79). Em estudo realizado por Feitosa et.al.(2012), os autores afirmam que a moagem de materiais podem provocar o aumento da intensidade dos picos, mas que este comportamento está associado ao aumento do estado de aglomeração das partículas.

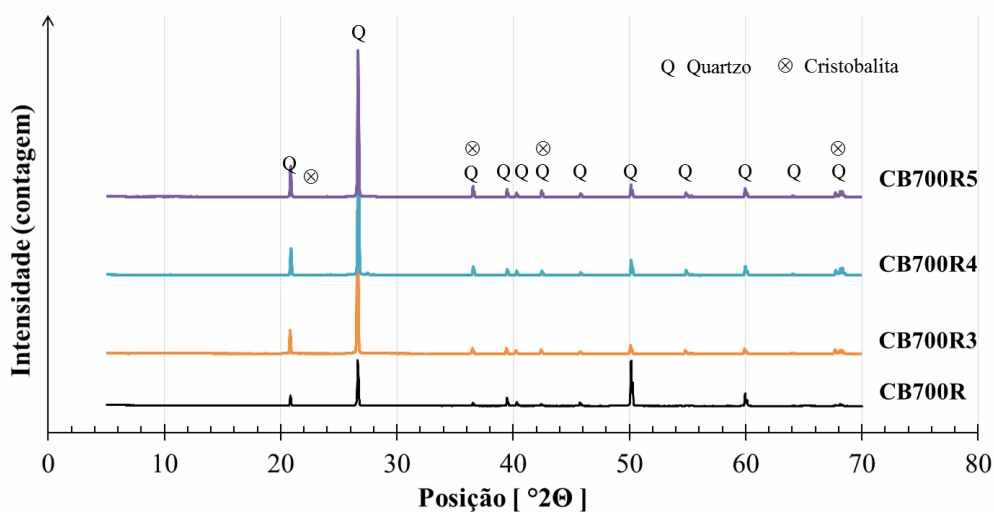
Os picos identificados na (Figura 4.10, Figura 4.11 e Figura 2.12) DRX da CBCA resfriada rapidamente são similares ao observado quando da aplicação do resfriamento lento, com ênfase na presença do quartzo. Porém, o resfriamento rápido provocou o surgimento da cristobalita já aos 700°C, contra 800° no resfriamento lento, indicando uma menor amorficidade em virtude do aumento de fases cristalinas.

Figura 4.10 – Difração de raios X da CBCA calcinada à 600°C, resfriada rapidamente e com os graus de moagem de 300 ± 20 , 400 ± 20 e 500 ± 20 m²/kg.



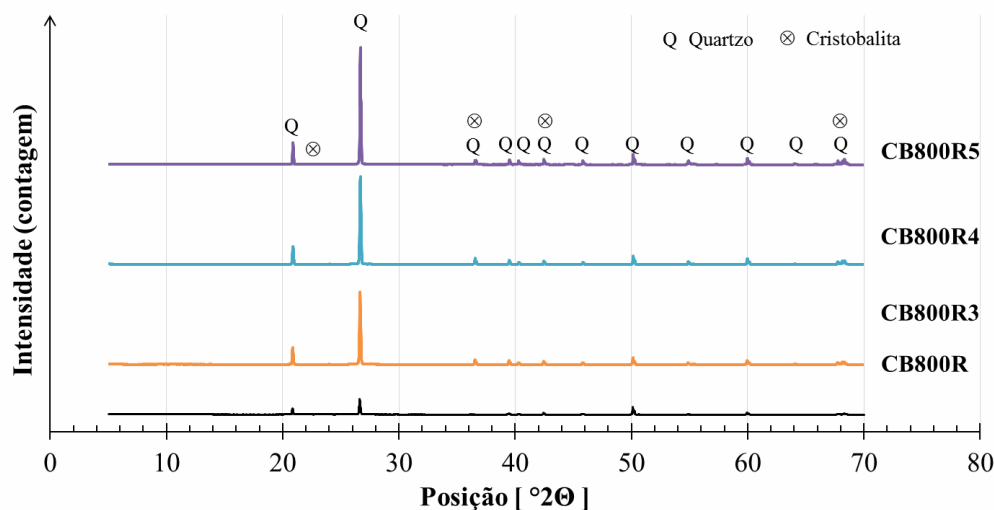
Fonte: Acervo Antônio Acácio de Melo Neto.

Figura 4.11 – Difração de raios X da CBCA calcinada à 700°C, resfriada rapidamente e com os graus de moagem de 300 ± 20 , 400 ± 20 e 500 ± 20 m²/kg.



Fonte: Acervo Antônio Acácio de Melo Neto.

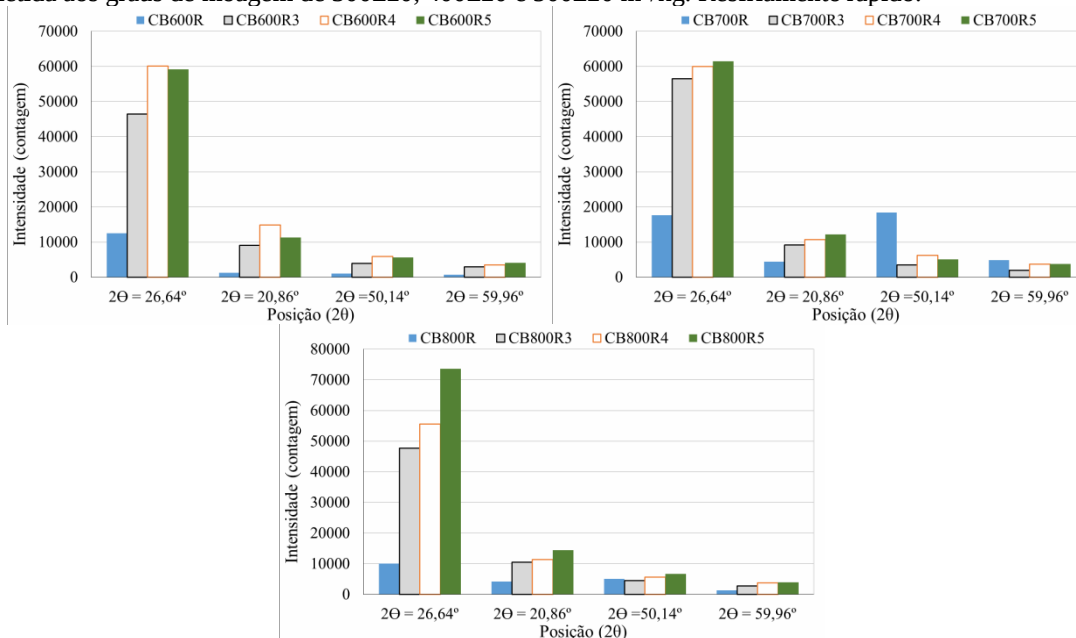
Figura 4.12 – Difração de raios X da CBCA calcinada à 800°C, resfriada rapidamente e com os graus de moagem de 300±20, 400±20 e 500±20 m²/kg.



Fonte: Acervo Antônio Acácio de Melo Neto.

Assim como na CBCA resfriada lentamente, a análise dos principais picos do quartzo na CBCA com resfriamento rápido indica o aumento da intensidade (DRX) com a moagem, mas que não trouxe tantos malefícios quando comparado aos benefícios do aumento da finura no efeito fíler e pozolânico.

Figura 4.13 – Gráfico comparativo das intensidades (DRX) dos picos principais do quartzo presente na CBCA submetida aos graus de moagem de 300±20, 400±20 e 500±20 m²/kg. Resfriamento rápido.

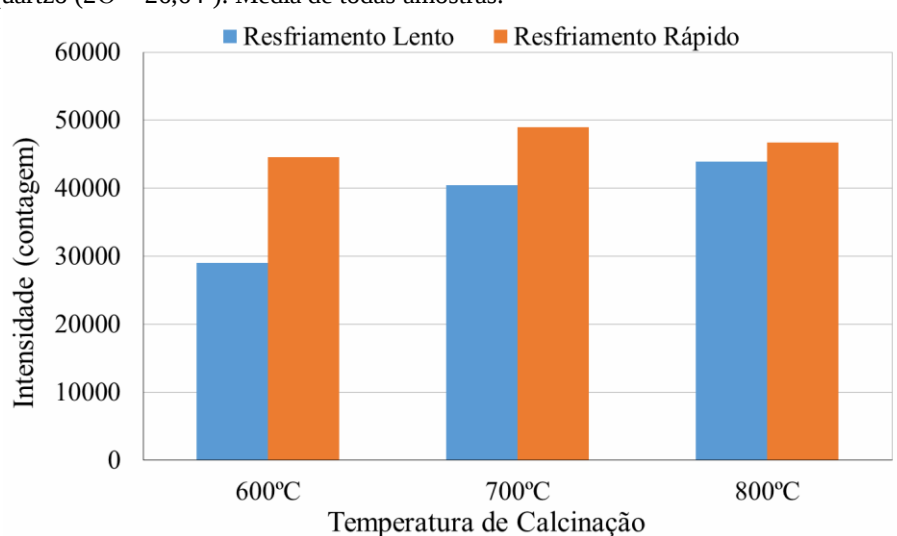


Fonte: Acervo Antônio Acácio de Melo Neto.

O tratamento térmico alterando o tipo de resfriamento de lento para rápido provocou o aumento da cristalinidade da CBCA, comportamento este associado ao aumento da intensidade (DRX) do pico principal do quartzo cristalino (Figura 4.14) localizado na posição

$2\theta = 26,64^\circ$. Esperava-se que ocorresse o aumento da amorficidade de modo similar a escória de alto-forno, porém ocorreu o aumento de cristalinidade de modo semelhante ao estudo realizado por Pouey (2006) com cinza de casca de arroz. Gobbi et.al. (2010) e Weber (2001) conseguiram melhora expressiva da amorficidade da CBCA com ganhos em sua pozolanicidade, porém, este trabalho utilizou o bagaço da cana-de-açúcar como matéria prima e efetuou seu tratamento térmico em laboratório.

Figura 4.14 – Efeito da temperatura de calcinação e do tipo de resfriamento na intensidade (DRX) do pico principal do quartzo ($2\theta = 26,64^\circ$). Média de todas amostras.



Fonte: Acervo Antônio Acácio de Melo Neto.

Conforme justificado anteriormente, optou-se por utilizar a cinza resultante do processo de queima do bagaço em caldeira, pois, é o resíduo que não apresenta nenhum valor comercial e é despejado no meio ambiente em grandes volumes. Também na **Figura**, observa-se que o aumento da temperatura de calcinação provocou o aumento da cristalinidade da CBCA. Ressalta-se a existência de grande variabilidade de temperaturas de calcinação da CBCA na literatura de 400°C a 900°C, porém, com os resultados obtidos neste trabalho, corrobora-se a afirmação de Cordeiro, Toledo Filho e Fairbairn (2009a) que indicam que para a CBCA seja utilizada uma calcinação na temperatura máxima de 600°C.

4.2 ABNT NBR 5752:1992

As tabelas abaixo trazem os resultados dos ensaios da norma NBR 5752:1992 para as cinzas com diferentes tratamentos e do metacaulim que serviu como pozolana de referência. De acordo com a **Tabela**, observa-se que o metacaulim alcançou o IAP superior ao exigido pela NBR 12653:1992 (75%), mesmo apresentando uma relação água/aglomerante superior ao da

mistura de referência, confirmando seu excelente potencial como adição. No entanto, em razão da sua elevada área específica (finura Blaine de 2245 m²/kg), a água requerida foi superior ao estabelecido (110%) pela NBR 12653:1992.

Comparando os resultados obtidos para os diferentes tipos de cinza podemos concluir que a CBCA possui baixa atividade pozolânica, na maioria das amostras, inferior ao IAP exigido pela norma NBR 12653:1992:(75%). Portanto, a CBCA não possui o mesmo desempenho que o metacaulim, mas dependendo do tipo de tratamento que a cinza receba ela poderia sim ser adotada como adição pozolânica.

Tabela 4.2 - Quadro resumo das propriedades da argamassa de referência e da argamassa com metacaulim. Moldagem de 6 corpos-de-prova.

Mistura	CPV (g)	MTC (g)	Areia (g)	Água (g)	Consistência média (mm)	Relação a/agl	IAP (%)	Água requerida (%)
REF0	624,00	-----	1872,00	349,44	226	0,560	-----	-----
MTC	405,60	177,81		390,74	227	0,670	103,73	111,8

Fonte: Acervo Antônio Acácio de Melo Neto.

Tabela 4.3 - Quadro resumo das propriedades da argamassa de referência e das argamassas com cinza do bagaço de cana-de-açúcar. Resfriamento lento. Moldagem de 6 corpos-de-prova.

Mistura	CPV (g)	CBCA (g)	Areia (g)	Água (g)	Consistência média (mm)	Relação a/agl	IAP (%)	Água requerida (%)
REF0	624,00	-----	1872,00	349,44	226	0,560	-----	-----
CAN	405,60	181,08	1872,00	362,65	225	0,618	43,34	103,8
CAN3		181,08		338,68	223	0,577	62,09	96,9
CAN4		181,08		339,34	229	0,578	65,68	97,1
CAN5		181,08		328,54	229	0,560	82,00	94,0
CB600L	405,60	183,00	1872,00	366,64	220	0,623	38,06	104,9
CB600L3		182,95		344,89	221	0,586	50,55	98,7
CB600L4		183,29		329,78	225	0,560	78,70	94,4
CB600L5		182,99		329,61	230	0,560	81,38	94,3
CB700L	405,60	182,34	1872,00	357,57	222	0,608	37,26	102,3
CB700L3		181,63		328,79	221	0,560	55,28	94,1
CB700L4		186,75		331,72	228	0,560	74,77	94,9
CB700L5		184,18		330,28	230	0,560	82,44	94,5
CB800L	405,60	183,66	1872,00	354,42	222	0,601	38,82	101,4
CB800L3		183,13		341,32	224	0,580	54,46	97,7
CB800L4		182,84		329,53	225	0,560	65,33	94,3
CB800L5		184,44		330,42	227	0,560	73,90	94,6

Fonte: Acervo Antônio Acácio de Melo Neto.

Tabela 4.4 - Quadro resumo das propriedades da argamassa de referência e das argamassas com cinza do bagaço de cana-de-açúcar. Resfriamento rápido. Moldagem de 6 corpos-de-prova.

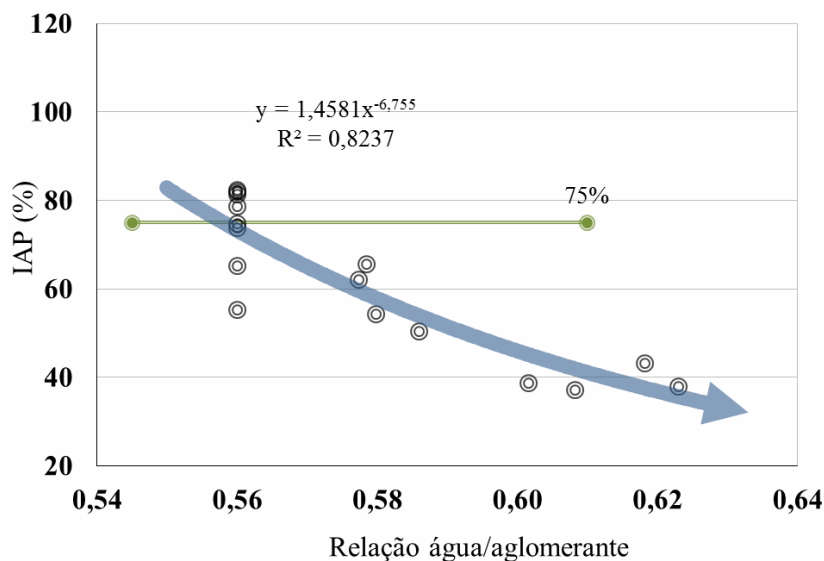
Mistura	CPV (g)	CBCA (g)	Areia (g)	Água (g)	Consistência média (mm)	Relação a/agl	IAP (%)	Água requerida (%)
REF0	624,00	-----	1872,00	349,44	226	0,560	-----	-----
CAN	405,60	181,08	1872,00	362,65	225	0,618	43,34	103,8
CAN3		181,08		338,68	223	0,577	62,09	96,9
CAN4		181,08		339,34	229	0,578	65,68	97,1
CAN5		181,08		328,54	229	0,560	82,00	94,0
CB600R	405,60	180,64	1872,00	377,30	229	0,644	38,20	108,0
CB600R3		185,51		348,10	228	0,589	64,32	99,6
CB600R4		183,62		334,50	220	0,568	73,00	95,7
CB600R5		185,23		330,60	220	0,560	71,79	94,6
CB700R	405,60	180,97	1872,00	396,70	228	0,676	40,07	113,5
CB700R3		179,21		349,90	222	0,598	58,90	100,1
CB700R4		181,07		341,50	220	0,582	68,89	97,7
CB700R5		181,21		349,80	224	0,596	74,14	100,1
CB800R	405,60	181,22	1872,00	407,80	230	0,695	42,88	116,7
CB800R3		179,92		352,90	222	0,603	66,63	101,0
CB800R4		184,06		345,20	221	0,585	67,55	98,8
CB800R5		180,96		346,20	222	0,590	72,71	99,1

Fonte: Acervo Antônio Acácio de Melo Neto.

Como era de se esperar as cinzas que possuíam maior área específica apresentaram maiores IAPs. A calcinação a 600°C e a 700°C seguido de resfriamento lento foi o tratamento térmico que apresentou melhores resultados, alcançando valores de IAP de 81,38% e 82,44% (Tabela 4.3), respectivamente. O resfriamento rápido só melhorou as propriedades pozolânicas das cinzas que tinham menor tempo de moagem, ou seja, as amostra R e R3.

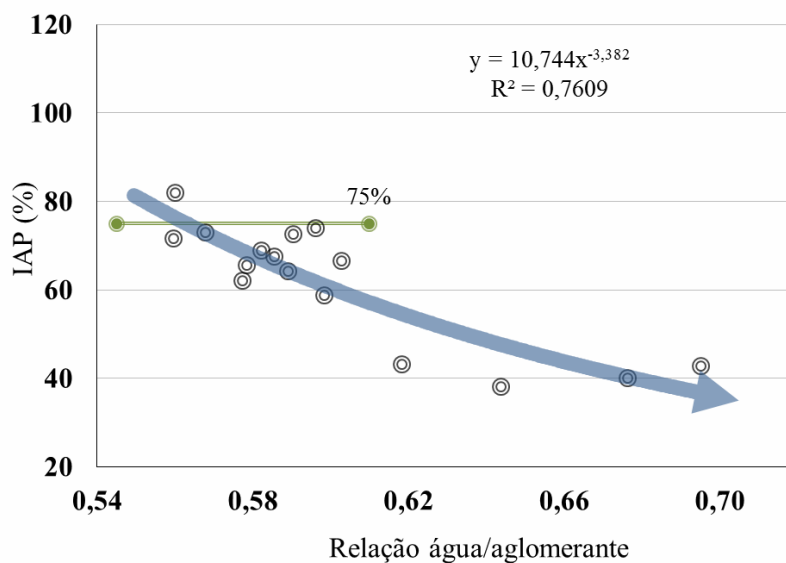
De acordo com os resultados, observa-se nas Figura 4.15 e Figura 4.16 a diminuição do IAP com o aumento da relação água/aglomerante, confirmando a principal crítica ao método descrito na NBR 5272:1992. As misturas que tiveram a relação água/aglomerante acima de 0,6 tiveram resistência mecânica a compressão extremamente reduzida. Este comportamento só não foi mais abrangente em razão do aumento da área específica da CBCA com a sua moagem. Ressalta-se que esta tendência foi constatada independentemente do tipo de resfriamento aplicado.

Figura 4.15 – Índice de atividade pozolânica (IAP) com cimento Portland da CBCA versus a relação água/aglomerante. Todas as amostras. Calcinação seguida de resfriamento lento.



Fonte: Acervo Antônio Acácio de Melo Neto.

Figura 4.16 – Índice de atividade pozolânica (IAP) com cimento Portland da CBCA versus a relação água/aglomerante. Todas as amostras. Calcinação seguida de resfriamento rápido.

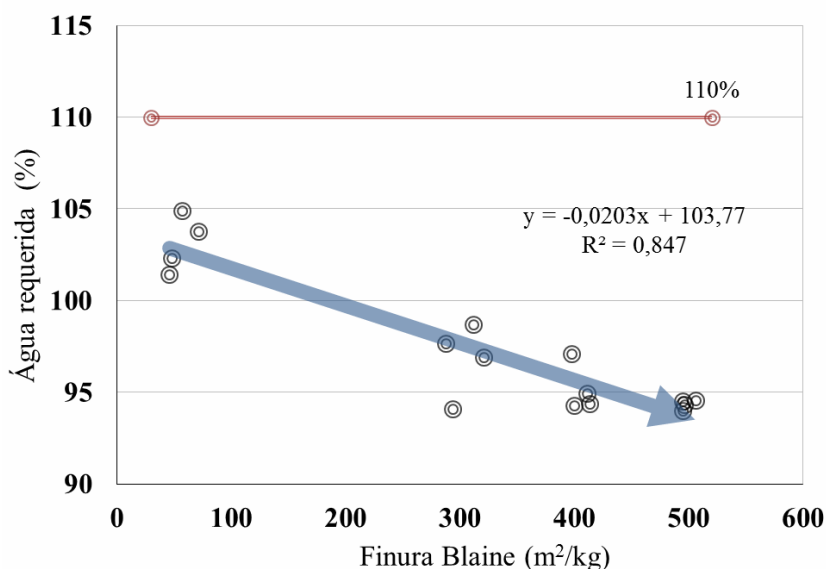


Fonte: Acervo Antônio Acácio de Melo Neto.

De acordo com os resultados, observa-se nas Figuras 4.17 e 4.18 que a CBCA com o aumento da área específica requer uma menor quantidade de água para a manutenção da consistência, ao contrário da metacaulim que apresenta uma água requerida em torno de 112%. Este comportamento é relevante, pois indica que argamassas e concretos com CBCA podem ter uma melhoria da trabalhabilidade atrelada a consistência, possivelmente se explicando pelo fenômeno da absorção de água similar ao que ocorre na cal hidratada. Assim como na

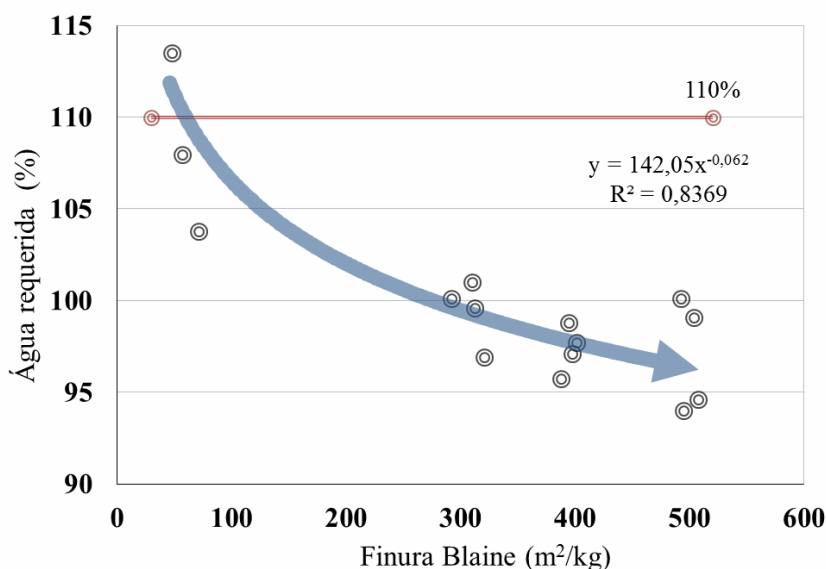
tendência observada na relação do IAP versus a relação água/aglomerante, este comportamento foi constatado independentemente do tipo de resfriamento aplicado.

Figura 4.17 – Água requerida versus a finura Blaine. Todas as amostras. Calcinação seguida de resfriamento lento.



Fonte: Acervo Antônio Acácio de Melo Neto.

Figura 4.18 – Água requerida versus a finura Blaine. Todas as amostras. Calcinação seguida de resfriamento rápido.



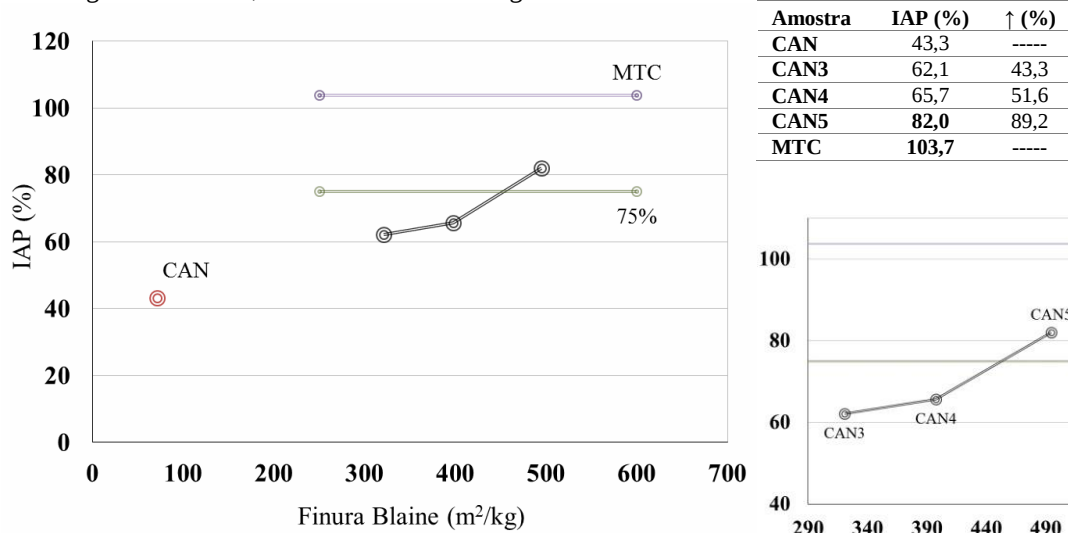
Fonte: Acervo Antônio Acácio de Melo Neto.

CBCA “in natura” - Efeito da moagem

A redução das partículas da CBCA “in natura” através da moagem levou a um aumento significativo de sua IAP, chegando inclusive ao índice de 82% (Figura 4.19), acima dos 75% determinados pela norma NBR 126353:1992. Estes dados apontam a possibilidade da

utilização da CBC proveniente das usinas como adição realizando apenas moagem, evitando um custo a mais com a calcinação. Outra possibilidade seria o ajuste na usina para que queima do bagaço ocorra de forma mais controlada, permitindo que a temperatura seja estabelecida e controlada.

Figura 4.19 – Índice de atividade pozolânica (IAP) com cimento Portland da CBCA “in natura” e submetida aos graus de moagem de 300 ± 20 , 400 ± 20 e 500 ± 20 m^2/kg .

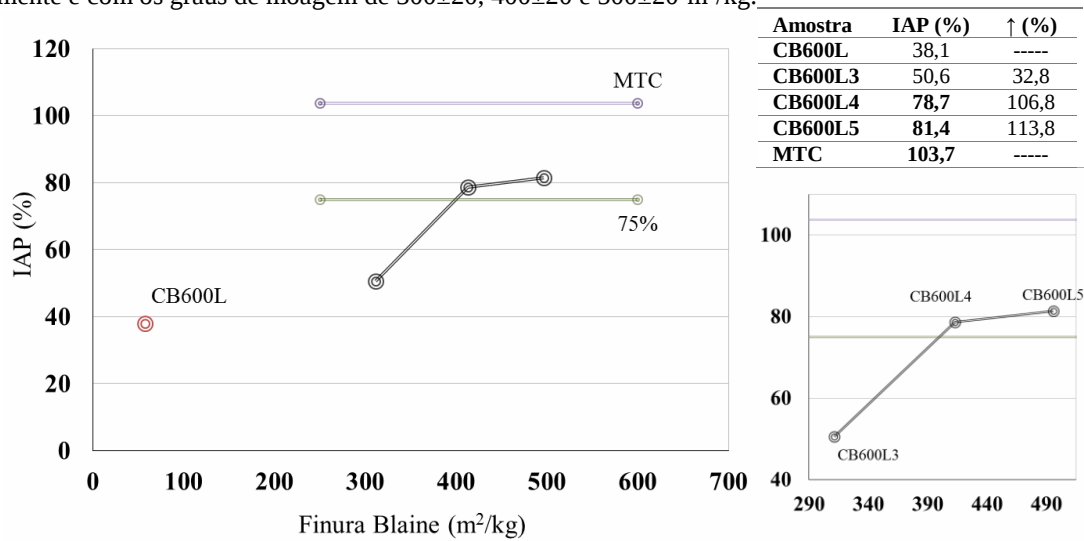


Fonte: Acervo Antônio Acácio de Melo Neto.

CBCA resfriada lentamente - Efeito da moagem

As duas amostras (CB600L4 e CB600L5) com finura acima de $300m^2/kg$ são, segundo a norma NBR 5752:1992, substâncias pozolânicas, havendo pouca diferença do IAP entre elas (Figura 4.20). Entretanto, a alteração de atividade pozolânica entre as amostras CB600L3 e CB600L4 é extremamente significativa. Este aumento de mais de 60% do IAP entre essas duas amostras indica que a cinza queimada a $600^{\circ}C$ apresenta sílica amorfa, que quando finamente dividida reage quimicamente com a pasta do cimento. Portanto, o incremento da atividade pozolânica entre as cinzas calcinadas a $600^{\circ}C$ não se explica apenas pelo efeito fíler, sendo esta afirmação confirmada com os resultados da atividade pozolânica com cal hidratada (item 4.4, pág.79).

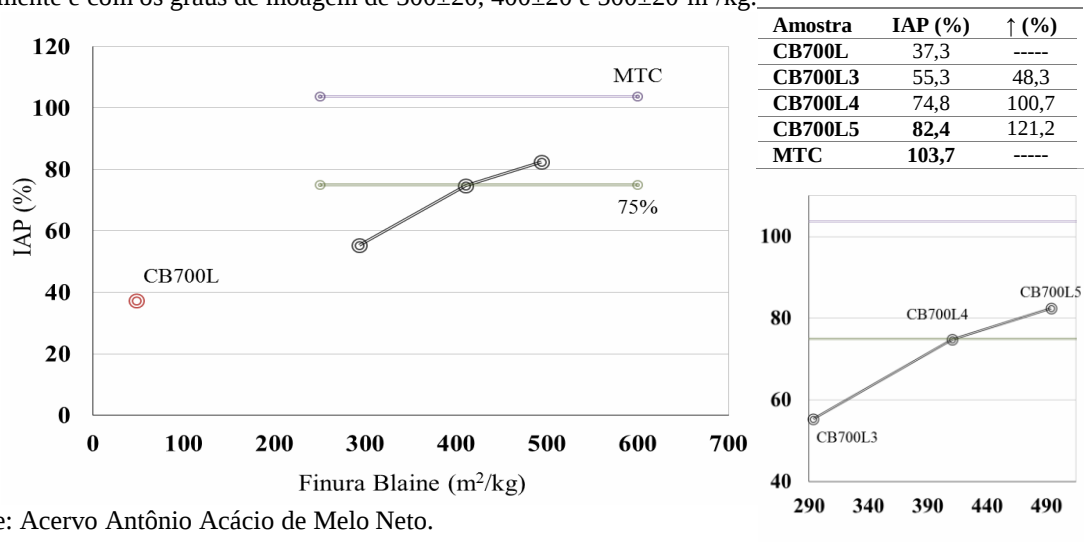
Figura 4.20 – Índice de atividade pozolânica (IAP) com cimento Portland da CBCA calcinada à 600°C, resfriada lentamente e com os graus de moagem de 300±20, 400±20 e 500±20 m²/kg.



Fonte: Acervo Antônio Acácio de Melo Neto.

Nas CBC calcinadas à 700°C ainda ocorre uma diferença considerável entre as amostras com moagem de 300±20 e 400±20 m²/kg, porém menos acentuada do que as amostras queimadas a 600°C. Este fato indica que há uma redução da quantidade de sílica amorfa presente na cinza à medida que há um aumento da temperatura de queima, confirmado pelos resultados da DRX.

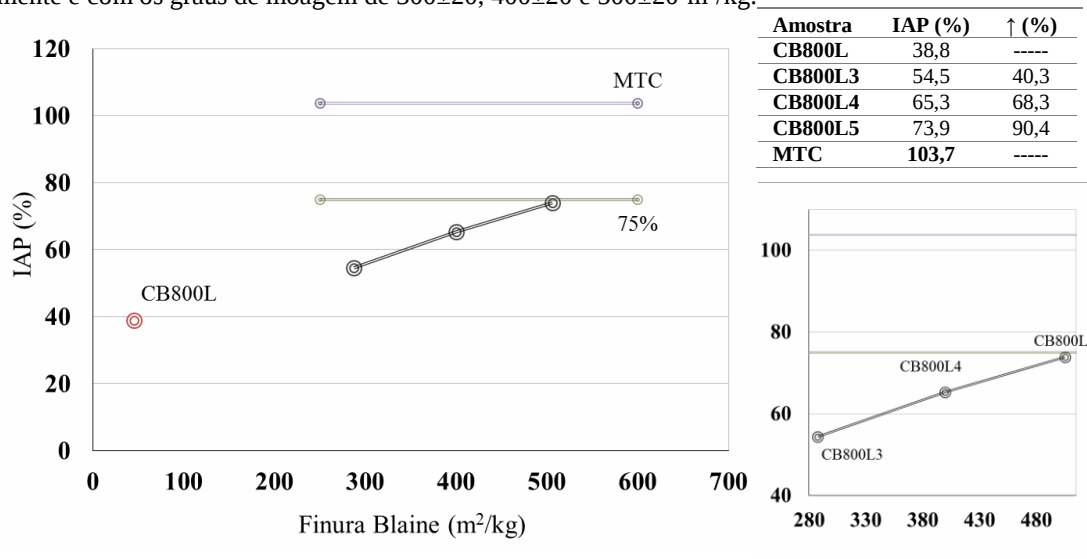
Figura 4.21 – Índice de atividade pozolânica (IAP) com cimento Portland da CBCA calcinada à 700°C, resfriada lentamente e com os graus de moagem de 300±20, 400±20 e 500±20 m²/kg.



Fonte: Acervo Antônio Acácio de Melo Neto.

Ao contrário das outras amostras, as CBCA calcinadas a 800°C apresentam uma relação IAP x Finura quase linear. Este fato indica que, nestas CBCA, o aumento do IAP é decorrente principalmente do efeito fíler e não pela reatividade de sua sílica. Provavelmente, grande parte da sílica presente nestas amostras está no estado cristalino apresentando reduzida reatividade.

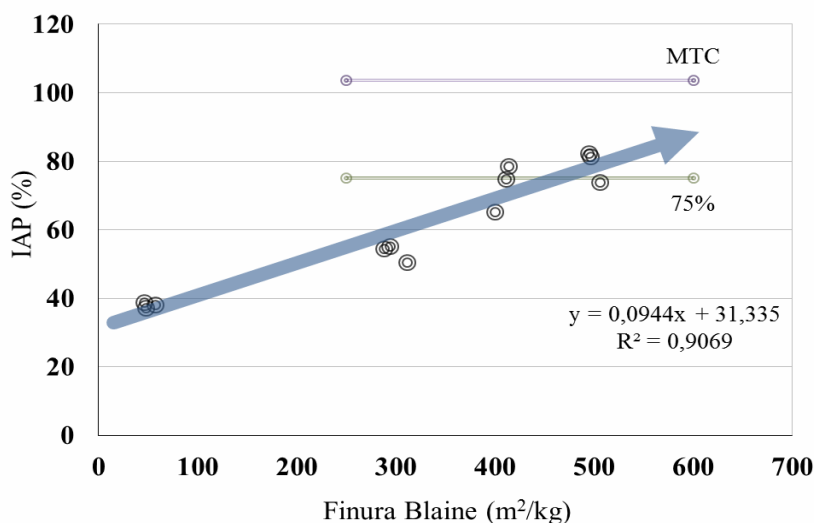
Figura 4.22 – Índice de atividade pozolânica (IAP) com cimento Portland da CBCA calcinada à 800°C, resfriada lentamente e com os graus de moagem de 300±20, 400±20 e 500±20 m²/kg.



Fonte: Acervo Antônio Acácio de Melo Neto.

Apesar de ser consensual a importância da moagem na adição de materiais em concretos e argamassas, a Figura 4.23 é importante ressaltar o efeito do aumento da superfície específica do material pozolânico, evidenciando que a moagem da CBCA é fundamental para a sua aplicação como adição. Os resultados deste trabalho também permitem afirmar que no avanço do estudo deste tema é importante a abordagem e estudo da moabilidade da CBCA, assim como a adoção de níveis de finura mais espaçados, como 500, 1000 e 1500 m²/kg. Apesar do aumento da finura por moagem envolver um custo, ressalta-se que a pozolana de referência, o metacaulim, passa por calcinação e moagem, alcançando uma finura Blaine em torno de 5 vezes maior do que o maior nível de moagem adotado neste trabalho (Tabela 4.1).

Figura 4.23 – Índice de atividade pozolânica (IAP) com cimento Portland da CBCA versus a finura Blaine. Todas as amostras. Calcinação seguida de resfriamento lento.

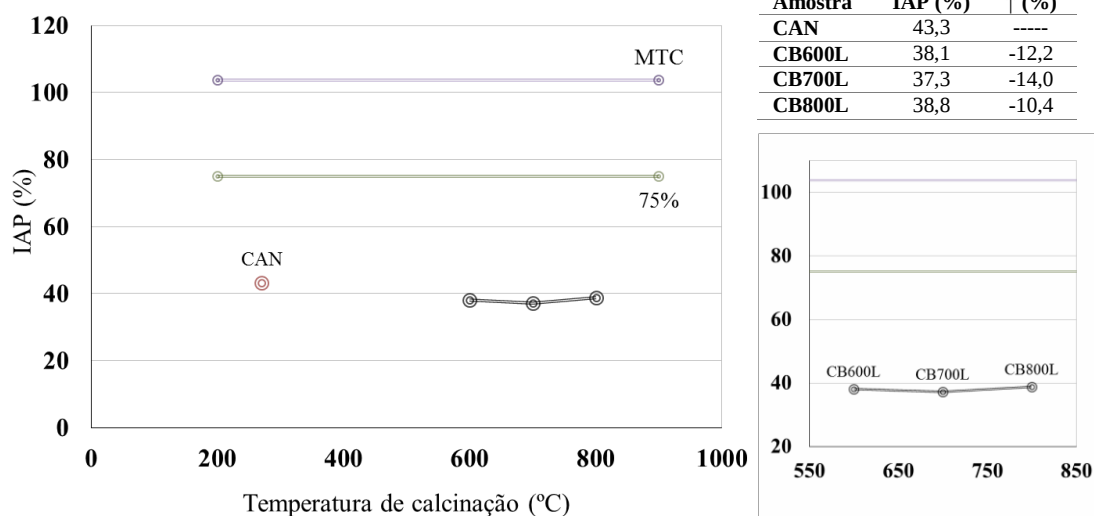


Fonte: Acervo Antônio Acácio de Melo Neto.

CBCA resfriada lentamente - Efeito da calcinação

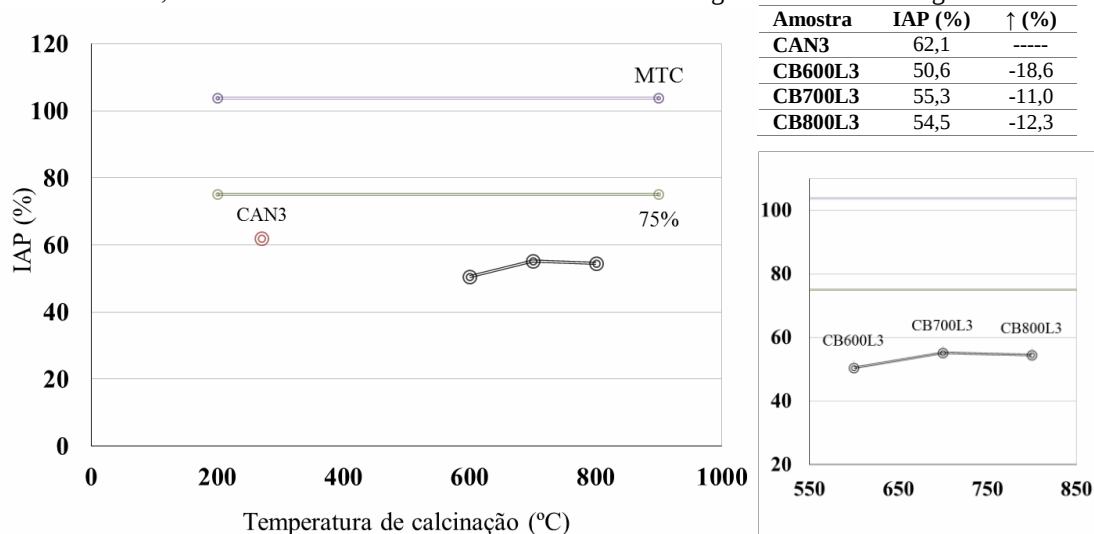
As CBCA que não passaram por processo de moagem apresentam reduzido IAP independente do tratamento térmico que receberam. A medida que sua superfície específica é aumentada a cinza se torna mais reativa. A partir das amostras com área específica de $400 \pm 20 \text{ m}^2/\text{kg}$ é que se observa mais claramente uma diferenciação de resultados pelos diferentes temperaturas de calcinação.

Figura 4.24 – Índice de atividade pozolânica (IAP) com cimento Portland da CBCA “in natura” e calcinada nas temperaturas de 600, 700 e 800°C com resfriamento lento. Sem moagem.



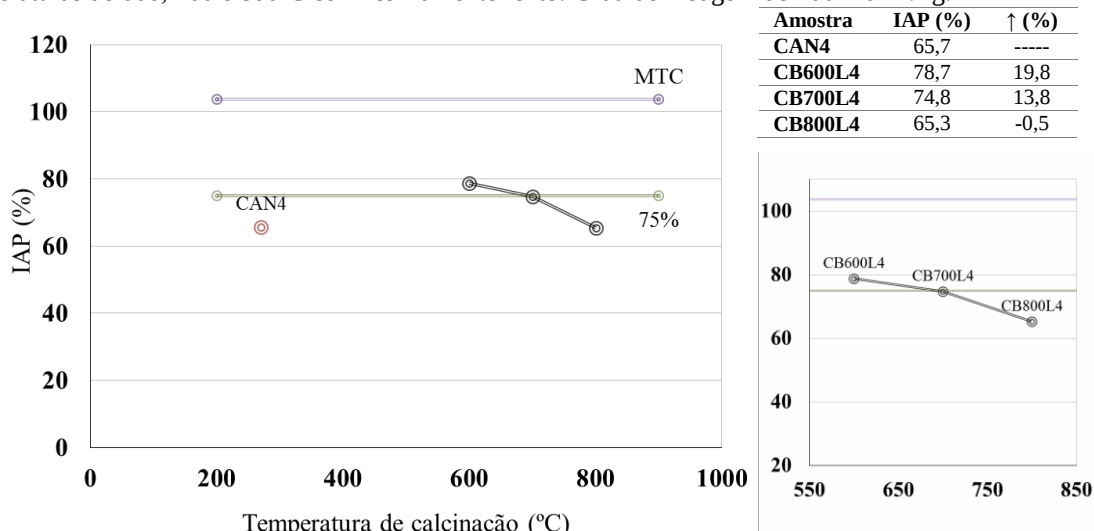
Fonte: Acervo Antônio Acácio de Melo Neto.

Figura 4.25 – Índice de atividade pozolânica (IAP) com cimento Portland da CBCA “in natura” e calcinada nas temperaturas de 600, 700 e 800°C com resfriamento lento. Grau de moagem de 300 ± 20 m²/kg.



Fonte: Acervo Antônio Acácio de Melo Neto.

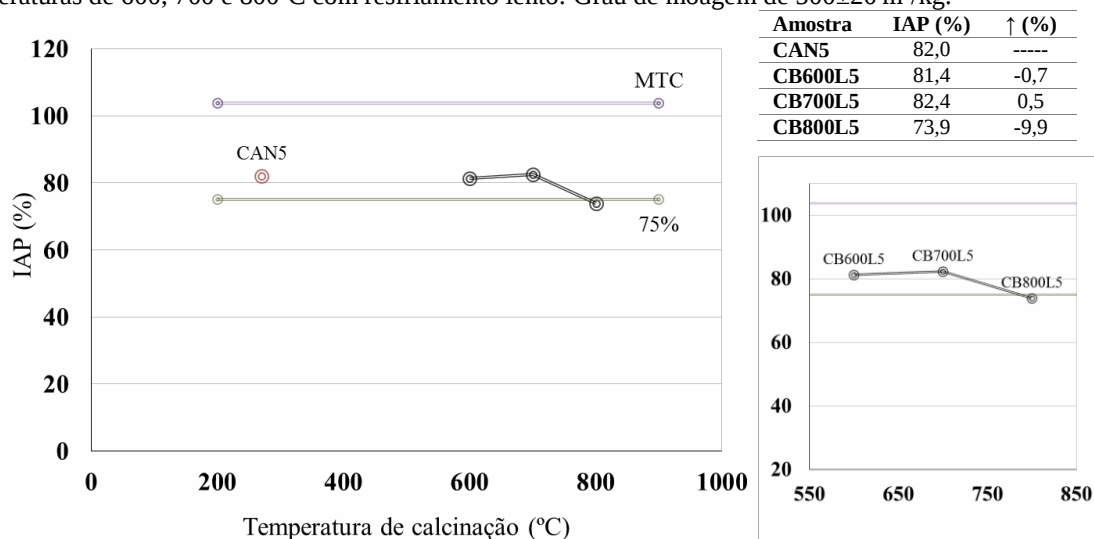
Figura 4.26 – Índice de atividade pozolânica (IAP) com cimento Portland da CBCA “in natura” e calcinada nas temperaturas de 600, 700 e 800°C com resfriamento lento. Grau de moagem de 400 ± 20 m²/kg.



Fonte: Acervo Antônio Acácio de Melo Neto.

A calcinação da cinza a 600°C e 700°C (Figura 4.27) se mostrou eficaz para o aumento da reatividade da cinza, provavelmente por remover da cinza impurezas como o CO₂. Já a calcinação a 800°C, independente do grau de moagem da cinza, apresentou resultados inferiores ao da cinza “in natura” reduzindo, portanto a reatividade da cinza. Porém, de modo geral, o efeito da temperatura de calcinação não foi positivo dentro dos limites deste trabalho, pois aumentou a cristalinidade da CBCA e, conseqüentemente, reduziu o seu potencial pozolânico. Conforme discutido na análise da DRX (item 4.1, pag. 51) as temperaturas de calcinação adotadas neste trabalho indicam que, em trabalhos futuros, a CBCA pode ter sua amorficidade prejudicada com a aplicação de temperaturas acima de 600°C.

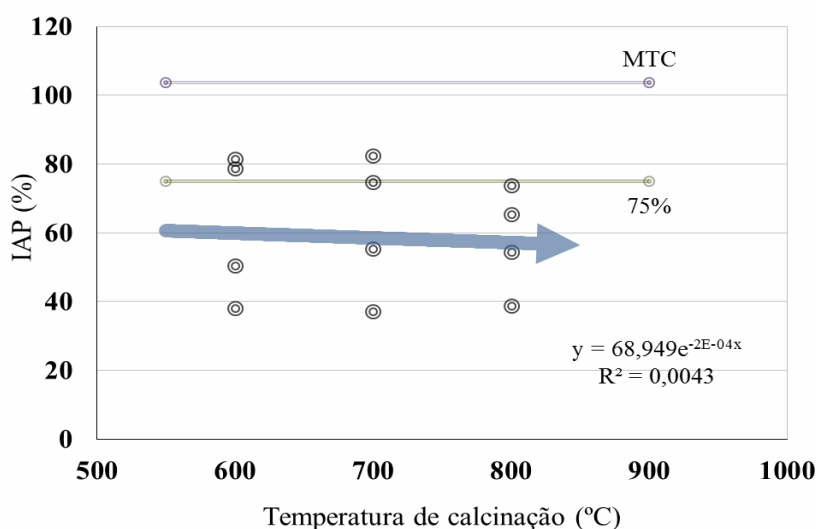
Figura 4.27 – Índice de atividade pozolânica (IAP) com cimento Portland da CBCA “in natura” e calcinada nas temperaturas de 600, 700 e 800°C com resfriamento lento. Grau de moagem de $500 \pm 20 \text{ m}^2/\text{kg}$.



Fonte: Acervo Antônio Acácio de Melo Neto.

A ineficiência do aumento da temperatura de calcinação é evidenciada na correlação total entre os resultados do IAP e a temperatura de calcinação. Não existe correlação entre os resultados, mostrando que o efeito da calcinação não alterou o IAP ou diminuiu o mesmo. Porém, ressalta-se que esta afirmação é com relação ao aumento da temperatura de calcinação de 600°C até 800°C, pois, a calcinação da CBCA “in natura” a 600°C e a moagem até o nível de finura Blaine $400 \pm 20 \text{ m}^2/\text{kg}$ apresentou aumento do IAP. Um efeito prático dos resultados obtidos é que permite afirmar que a moagem acima da finura Blaine $400 \pm 20 \text{ m}^2/\text{kg}$ pode dispensar temperaturas de calcinação da CBCA acima de 600°C. Ressalta-se, novamente, que às afirmações são limitadas as condições do trabalho.

Figura 4.28 – Índice de atividade pozolânica (IAP) com cimento Portland da CBCA versus a temperatura de calcinação. Todas as amostras. Calcinação seguida de resfriamento lento.

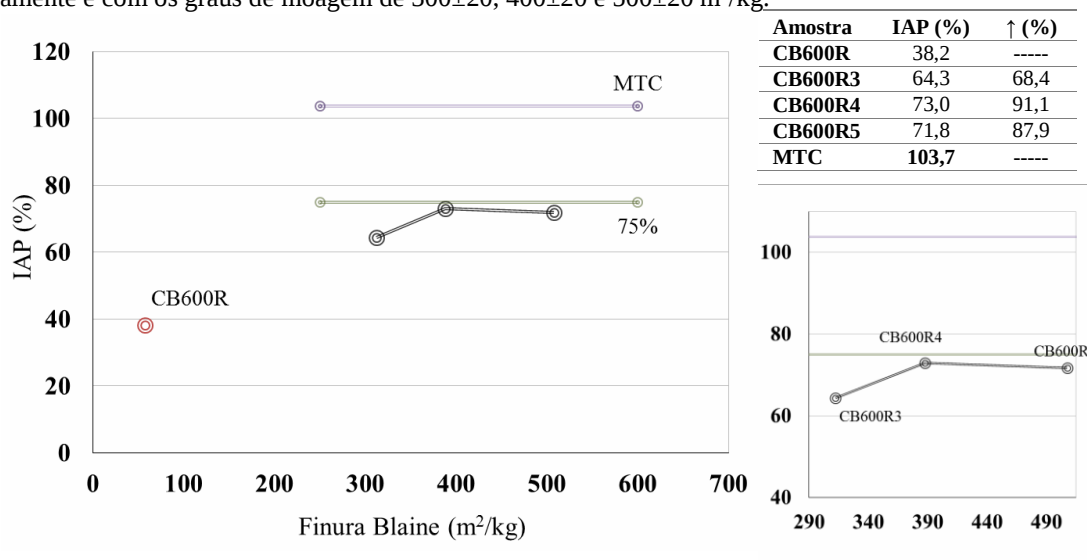


Fonte: Acervo Antônio Acácio de Melo Neto.

CBCA resfriada rapidamente - Efeito da moagem

A análise do efeito da moagem da CBCA quando aplicado o resfriamento rápido foi similar à análise com resfriamento lento, porém, conforme abordado anteriormente nos resultados de DRX, o resfriamento rápido diminuiu a amorficidade da CBCA decorrente do aumento das fases cristalinas.

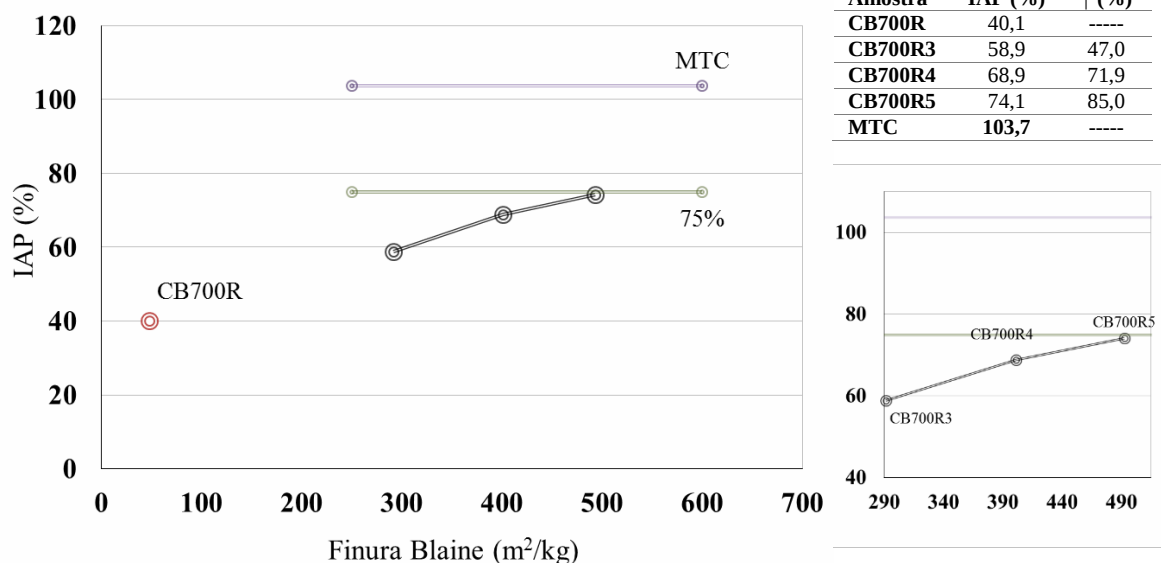
Figura 4.29 – Índice de atividade pozolânica (IAP) com cimento Portland da CBCA calcinada à 600°C, resfriada rapidamente e com os graus de moagem de 300±20, 400±20 e 500±20 m²/kg.



Fonte: Acervo Antônio Acácio de Melo Neto.

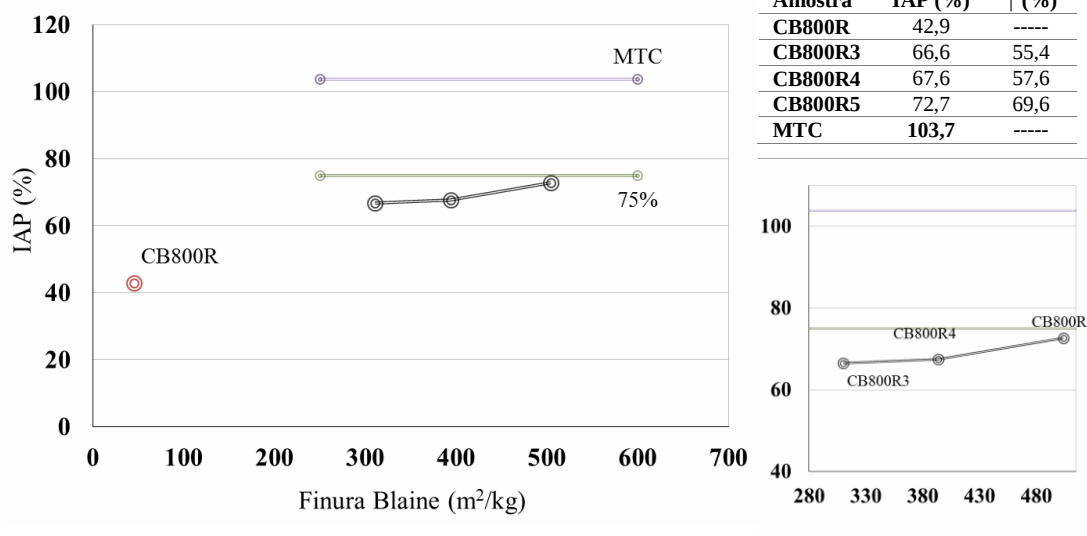
Comparando os resultados obtidos com os da cinza de resfriamento lento, há uma maior proximidade dos índices de IAP das cinzas com diferentes graus de moagem (Figuras 4.29, Figuras 4.30 e Figura 4.31). Neste caso, a moagem continuou sendo um fator importante para o aumento do IAP das cinzas, porém de forma menos acentuada. As cinzas sem moagem mantiveram IAP inferior a 45%, já as cinzas com algum grau de moagem tiveram o IAP entre 58,9% e 82,0%.

Figura 4.30 – Índice de atividade pozolânica (IAP) com cimento Portland da CBCA calcinada à 700°C, resfriada rapidamente e com os graus de moagem de 300±20, 400±20 e 500±20 m²/kg.



Fonte: Acervo Antônio Acácio de Melo Neto.

Figura 4.31 – Índice de atividade pozolânica (IAP) com cimento Portland da CBCA calcinada à 800°C, resfriada rapidamente e com os graus de moagem de 300±20, 400±20 e 500±20 m²/kg.

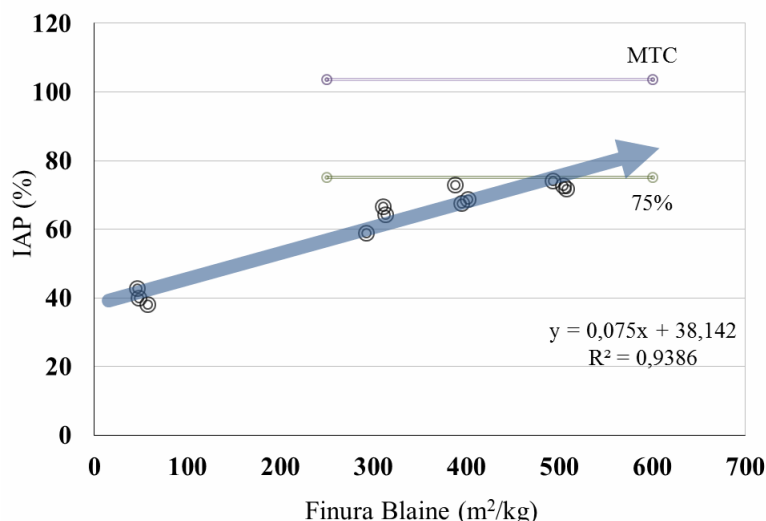


Fonte: Acervo Antônio Acácio de Melo Neto.

Corroborando para a discussão abordada nos resultados de DRX, o resfriamento rápido não teve o comportamento esperado com base na revisão bibliográfica, ao contrário: ocorreu um decréscimo no IAP da maior parte das amostras estudadas, em comparação com o resfriamento lento. Percebe-se uma congruência entre a análise da microestrutura por DRX e os resultados da pozolanicidade por métodos físicos. Apesar de limitado ao escopo deste trabalho, esta conclusão pode ser importante para que uma abordagem exploratória da microestrutura seja realizada em estudos posteriores, de modo a minimizar a quantidade de variáveis empregadas nos métodos físicos.

Assim como na CBCA resfriada lentamente, existe uma correlação entre o aumento da finura Blaine e o aumento do IAP (Figura 4.32) quando da aplicação do resfriamento rápido. Porém, ressalta-se que nenhuma amostra de CBCA conseguiu ultrapassar o limite de 75% no valor do IAP para ser considerado pozolânico.

Figura 4.32 – Índice de atividade pozolânica (IAP) com cimento Portland da CBCA versus a finura Blaine. Todas as amostras. Calcinação seguida de resfriamento rápido.

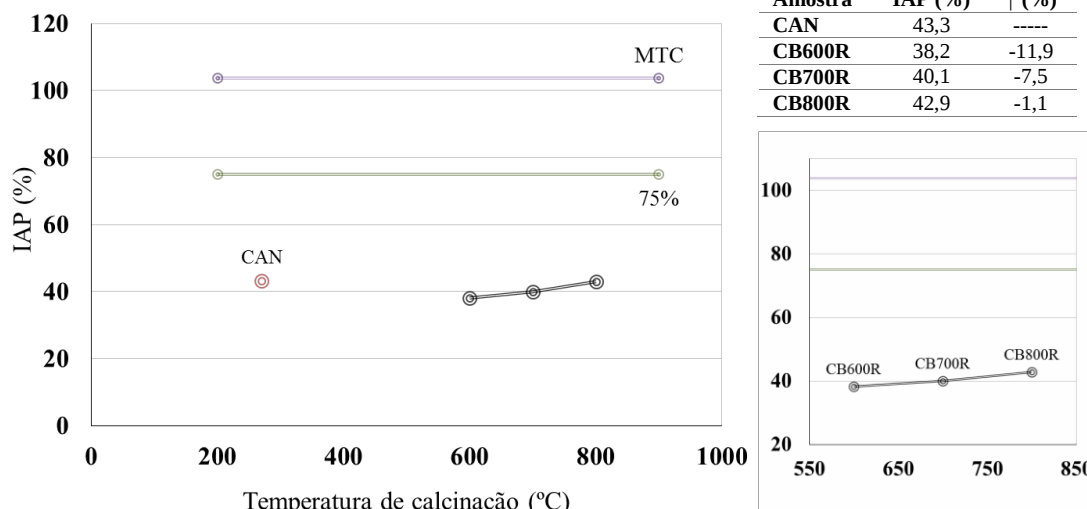


Fonte: Acervo Antônio Acácio de Melo Neto.

CBCA resfriada rapidamente - Efeito da calcinação

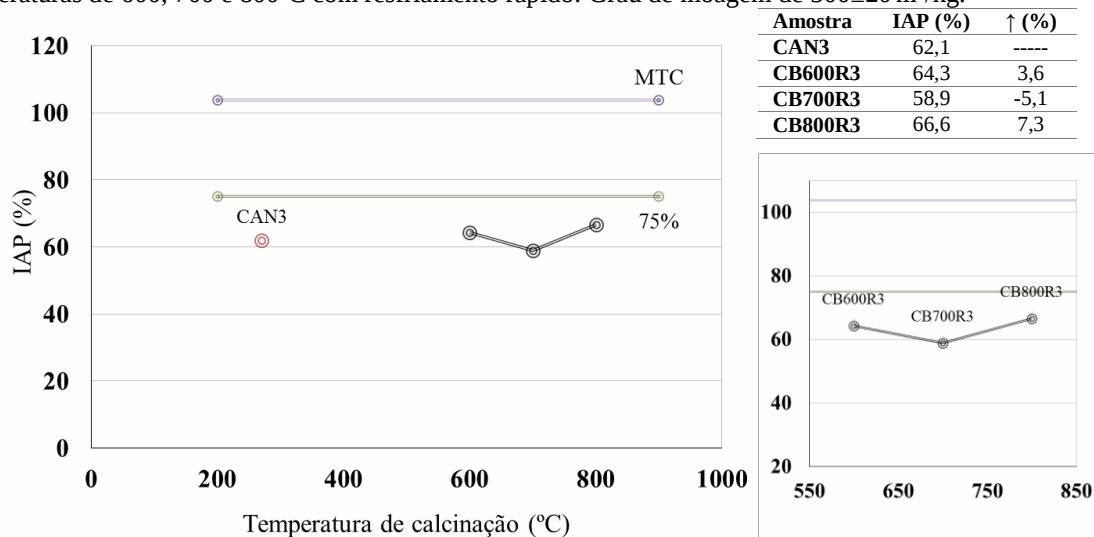
Para as cinzas que não receberam moagem o tratamento térmico, independente da temperatura de calcinação reduziu seus IAPs (Figura 4.33, Figura 4.34, Figura 4.35 e Figura 4.36). Já as cinzas com grau de moagem de $300 \pm 20 \text{ m}^2/\text{kg}$ obtiveram um aumento do IAP nas temperaturas de calcinação de 600°C e 700°C . Por sua vez, as cinzas com moagem de $400 \pm 20 \text{ m}^2/\text{kg}$, obtiveram ganhos no seu IAP nas três temperaturas de calcinação, porém a temperatura de 600°C foi a que proporcionou melhores resultados. Por fim, a cinza com grau de moagem de $500 \pm 20 \text{ m}^2/\text{kg}$ obteve uma redução do seu IAP em todas as temperaturas de calcinação.

Figura 4.33 – Índice de atividade pozolânica (IAP) com cimento Portland da CBCA “in natura” e calcinada nas temperaturas de 600, 700 e 800°C com resfriamento rápido. Sem moagem.



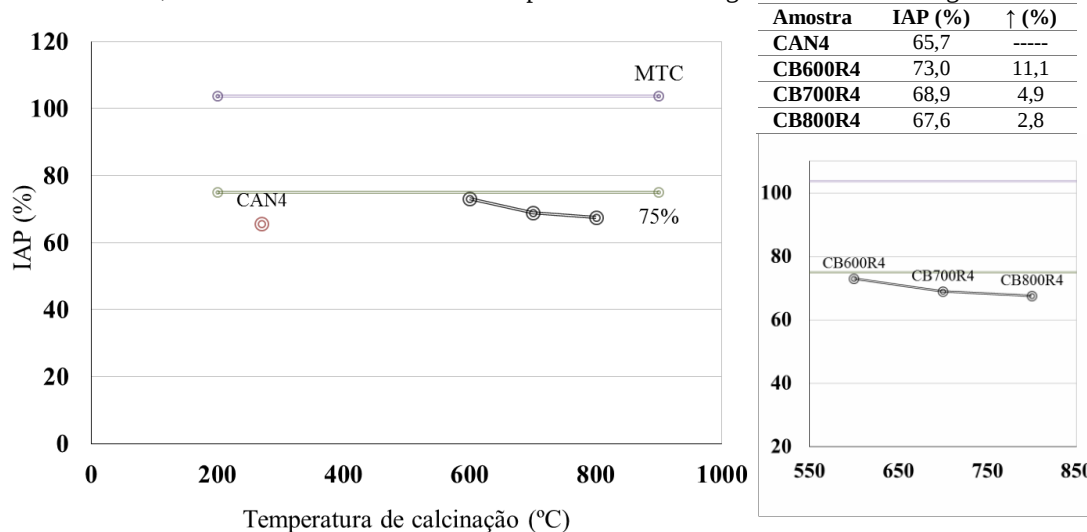
Fonte: Acervo Antônio Acácio de Melo Neto.

Figura 4.34 – Índice de atividade pozolânica (IAP) com cimento Portland da CBCA “in natura” e calcinada nas temperaturas de 600, 700 e 800°C com resfriamento rápido. Grau de moagem de $300 \pm 20 \text{ m}^2/\text{kg}$.



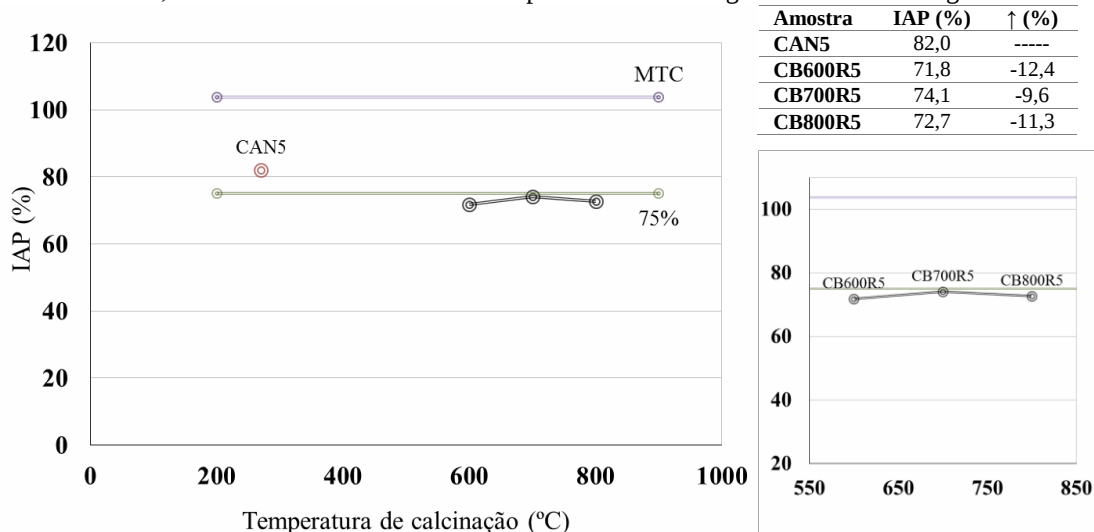
Fonte: Acervo Antônio Acácio de Melo Neto.

Figura 4.35 – Índice de atividade pozolânica (IAP) com cimento Portland da CBCA “in natura” e calcinada nas temperaturas de 600, 700 e 800°C com resfriamento rápido. Grau de moagem de $400 \pm 20 \text{ m}^2/\text{kg}$.



Fonte: Acervo Antônio Acácio de Melo Neto.

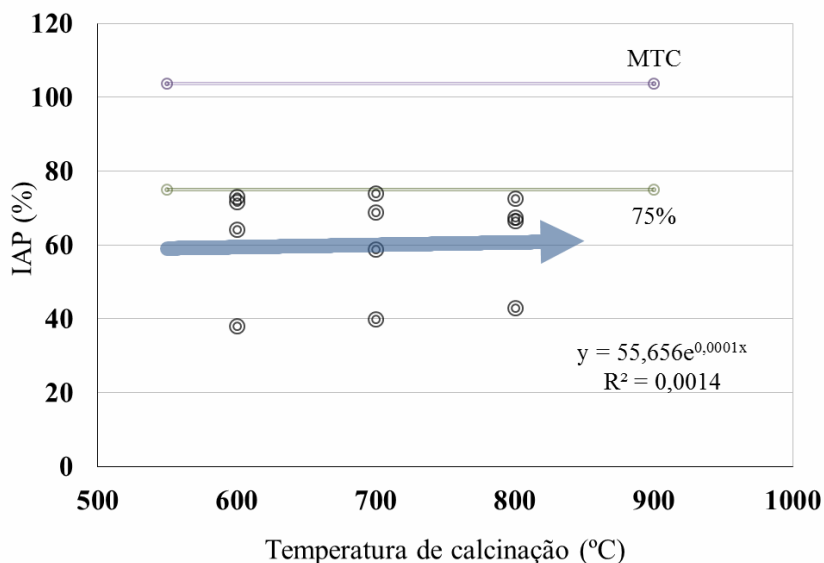
Figura 4.36 – Índice de atividade pozolânica (IAP) com cimento Portland da CBCA “in natura” e calcinada nas temperaturas de 600, 700 e 800°C com resfriamento rápido. Grau de moagem de $500 \pm 20 \text{ m}^2/\text{kg}$.



Fonte: Acervo Antônio Acácio de Melo Neto.

Os resultados indicam que, mesmo com a diminuição do IAP com o resfriamento rápido, a temperatura de 600°C parece ser a mais indicada como limite superior para a variação da temperatura de calcinação da CBCA. Assim como no resfriamento lento, a correlação entre o IAP e a temperatura de calcinação (figura 4.37) não ocorreu, confirmando que as temperaturas de calcinação adotadas neste trabalho não aumentaram a pozolanicidade da CBCA, provocando até mesmo um decréscimo.

Figura 4.37 – Índice de atividade pozolânica (IAP) com cimento Portland da CBCA versus a temperatura de calcinação. Todas as amostras. Calcinação seguida de resfriamento rápido.



Fonte: Acervo Antônio Acácio de Melo Neto.

ABNT NBR 5752:1992 MODIFICADA

As tabelas abaixo trazem os resultados dos ensaios da norma NBR 5752:1992 modificada para as cinzas com diferentes tratamentos e do metacaulim. Em todas as misturas a relação água/aglomerante foi mantida em 0,56. Esta relação água/aglomerante foi adotada com base no resultado obtido na mistura de referência sem aditivo. Para que a consistência média não fosse alterada se acrescentou na mistura das pastas aditivo superplastificante. A pasta produzida com metacaulim foi a que necessitou de uma maior quantidade de aditivo, superior a 100%, devido a sua reduzida granulométrica.

As pastas produzidas com os diferentes tipos de cinza precisaram de uma quantidade reduzida de superplastificante para manter o abatimento de 225mm, especificamente nas CBCA com maior grau de moagem. Entre as cinzas resfriada lentamente, as que não possuíam moagem consumiram maior quantidade de aditivo (Tabela 4.6).

Tabela 4.5 - Quadro resumo das propriedades da argamassa de referência e da argamassa com metacaulim. Moldagem de 6 corpos-de-prova. ABNT NBR 5752:1992 Modificada.

Mistura	CPV (g)	MTC (g)	Areia (g)	Água (g)	Consistência média (mm)	Relação a/agl	IAP (%)	Aditivo (%)
REF0	624,00	-----	1872,00	349,44	226	0,560	-----	-----
MTC	405,60	177,81		326,71	224	0,560	121,60	111,8

Fonte: Acervo Antônio Acácio de Melo Neto.

Tabela 4.6 - Quadro resumo das propriedades da argamassa de referência e das argamassas com cinza do bagaço de cana-de-açúcar. Moldagem de 6 corpos-de-prova. ABNT NBR 5752:1992 Modificada. Resfriamento lento.

Mistura	CPV (g)	CBCA (g)	Areia (g)	Água (g)	Consistência média (mm)	Relação a/agl	IAP (%)	Aditivo (%)
REF0	624,00	-----	1872,00	349,44	226	0,560	-----	-----
CAN	405,60	181,08	1872,00	328,54	224	0,560	42,41	0,26
CAN3		181,08		328,54	230	0,560	71,72	0,13
CAN4		181,08		328,54	229	0,560	76,60	0,12
CAN5		181,08		328,54	229	0,560	82,00	-----
CB600L	405,60	183,00	1872,00	329,61	222	0,560	39,01	0,29
CB600L3		182,95		329,59	224	0,560	70,98	0,35
CB600L4		183,29		329,78	225	0,560	78,70	-----
CB600L5		182,99		329,61	230	0,560	81,38	-----
CB700L	405,60	182,34	1872,00	329,25	224	0,560	52,93	0,44
CB700L3		181,63		328,85	226	0,560	55,28	-----
CB700L4		186,75		331,72	228	0,560	74,77	-----
CB700L5		184,18		330,28	230	0,560	82,44	-----
CB800L	405,60	183,66	1872,00	329,98	220	0,560	46,70	0,21
CB800L3		183,13		329,69	226	0,560	59,74	0,17
CB800L4		182,84		329,53	225	0,560	65,33	-----
CB800L5		184,44		330,42	227	0,560	73,90	-----

Fonte: Acervo Antônio Acácio de Melo Neto.

As cinzas com resfriamento rápido apresentaram comportamento distinto das cinzas com resfriamento lento, caracterizando pelas diferentes porcentagens no uso de aditivo superplastificante (Tabela 4.7). É possível que este tipo de tratamento tenha alterado a capacidade de absorção de água em comparação com o resfriamento lento (item 4.2 pág. 60).

Tabela 4.7 - Quadro resumo das propriedades da argamassa de referência e das argamassas com cinza do bagaço de cana-de-açúcar. Moldagem de 6 corpos-de-prova. ABNT NBR 5752:1992 Modificada. Resfriamento rápido.

Mistura	CPV (g)	CBCA (g)	Areia (g)	Água (g)	Consistência média (mm)	Relação a/agl	IAP (%)	Aditivo (%)
REF0	624,00	-----	1872,00	349,44	226	0,560	-----	-----
CAN	405,60	181,08	1872,00	328,54	224	0,560	42,41	0,26
CAN3		181,08		328,54	230	0,560	71,72	0,13
CAN4		181,08		328,54	229	0,560	76,60	0,12
CAN5		181,08		328,54	229	0,560	82,00	-----
CB600R	405,60	180,64	1872,00	328,29	227	0,560	32,18	0,17
CB600R3		185,51		331,02	229	0,560	54,67	0,10
CB600R4		183,62		329,96	225	0,560	65,93	0,01
CB600R5		185,23		330,86	225	0,560	74,29	0,03
CB700R	405,60	180,97	1872,00	328,48	229	0,560	39,87	0,34
CB700R3		179,21		327,49	229	0,560	55,85	0,21
CB700R4		181,07		328,53	223	0,560	66,10	0,11
CB700R5		181,21		328,61	232	0,560	72,45	0,13
CB800R	405,60	181,22	1872,00	328,62	224	0,560	42,35	0,28
CB800R3		179,92		327,89	224	0,560	62,90	0,19
CB800R4		184,06		330,21	228	0,560	66,15	0,16
CB800R5		180,96		328,47	224	0,560	74,12	0,06

Fonte: Acervo Antônio Acácio de Melo Neto.

Quando comparado os resultados da NBR 5752:1992 com e sem a modificação (Tabela 4.8), observa-se que a manutenção da relação água/aglomerante utilizando aditivo provocou o aumento do IAP apenas na CBCA resfriada lentamente. Este comportamento é discutido no item 4.5 (pág.101).

Tabela 4.8 - Quadro comparativo do IAP (%) obtido com a ABNT NBR 5752:1992 e a ABNT NBR 5752:1992 modificada. Em negrito estão marcadas as amostras onde ocorreu o aumento do IAP.

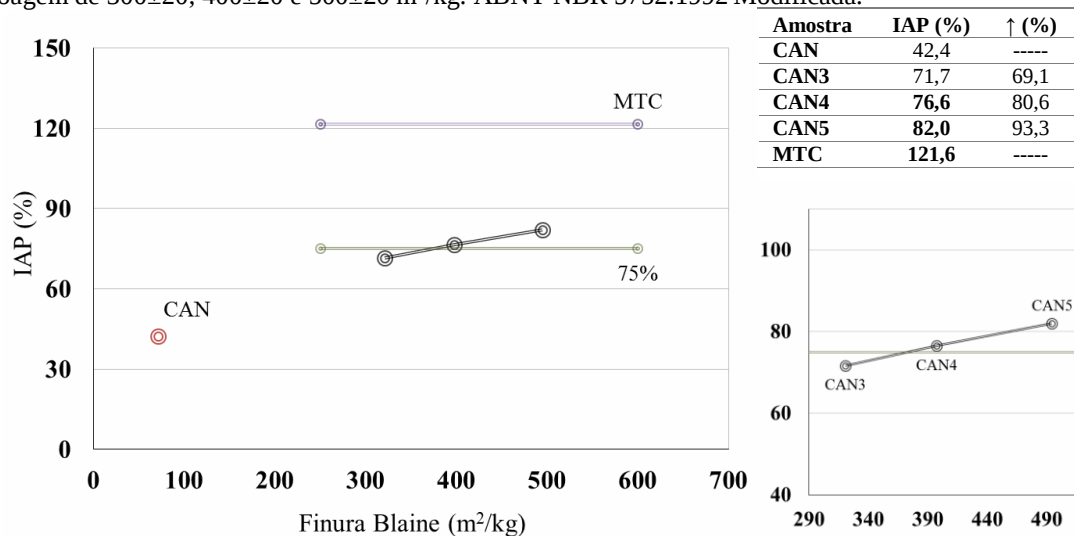
	ABNT NBR 5752:1992	ABNT NBR 5752:1992 Modificada
Amostra	IAP (%)	
CAN	43,34	42,41
CAN3	62,09	71,72
CAN4	65,68	76,60
CAN5	82,00	82,00
CB600L	38,06	39,01
CB600L3	50,55	70,98
CB600L4	78,70	78,70
CB600L5	81,38	81,38
CB700L	37,26	52,93
CB700L3	55,28	55,28
CB700L4	74,77	74,77
CB700L5	82,44	82,44
CB800L	38,82	46,70
CB800L3	54,46	59,74
CB800L4	65,33	65,33
CB800L5	73,90	73,90
MTC	103,73	121,60
CB600R	38,20	32,18
CB600R3	64,32	54,67
CB600R4	73,00	65,93
CB600R5	71,79	74,29
CB700R	40,07	39,87
CB700R3	58,90	55,85
CB700R4	68,89	66,10
CB700R5	74,14	72,45
CB800R	42,88	42,35
CB800R3	66,63	62,90
CB800R4	67,55	66,15
CB800R5	72,71	74,12

Fonte: Acervo Antônio Acácio de Melo Neto.

CBCA “in natura” - Efeito da moagem

Acompanhando o comportamento observado na NBR 5752:1992 sem modificação, à medida que se aumenta o grau de moagem, o IAP da cinza “in natura” aumenta chegando ao valor de 82%. Estes dados apontam a possibilidade da utilização da CBCA como adição pozolânica empregando apenas o processo de moagem para reduzir sua granulométrica e aumentar sua reatividade.

Figura 4.38 – Índice de atividade pozolânica (IAP) com cimento Portland da CBCA “in natura” e com os graus de moagem de 300 ± 20 , 400 ± 20 e 500 ± 20 m^2/kg . ABNT NBR 5752:1992 Modificada.

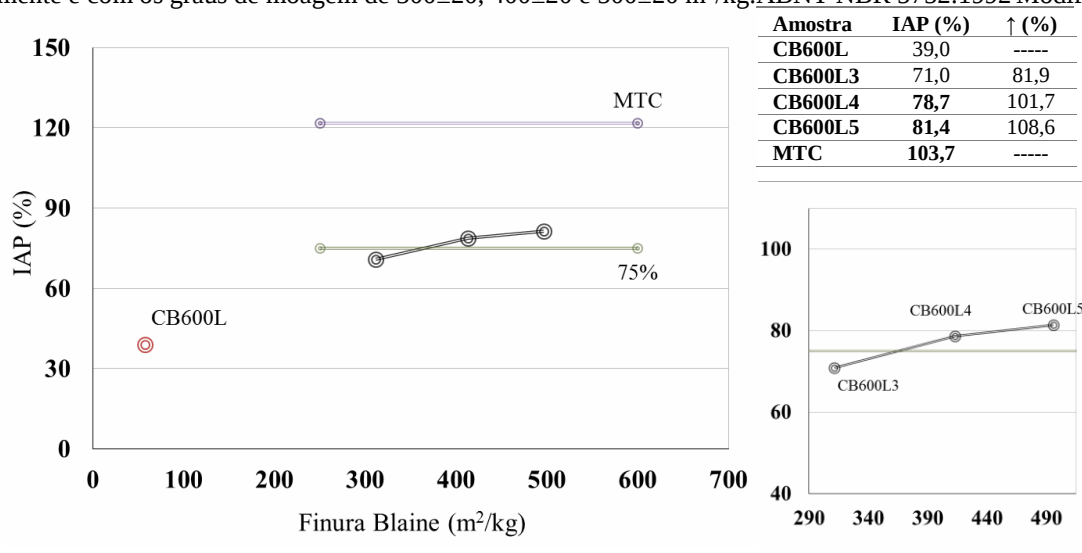


Fonte: Acervo Antônio Acácio de Melo Neto.

CBCA resfriada lentamente - Efeito da moagem

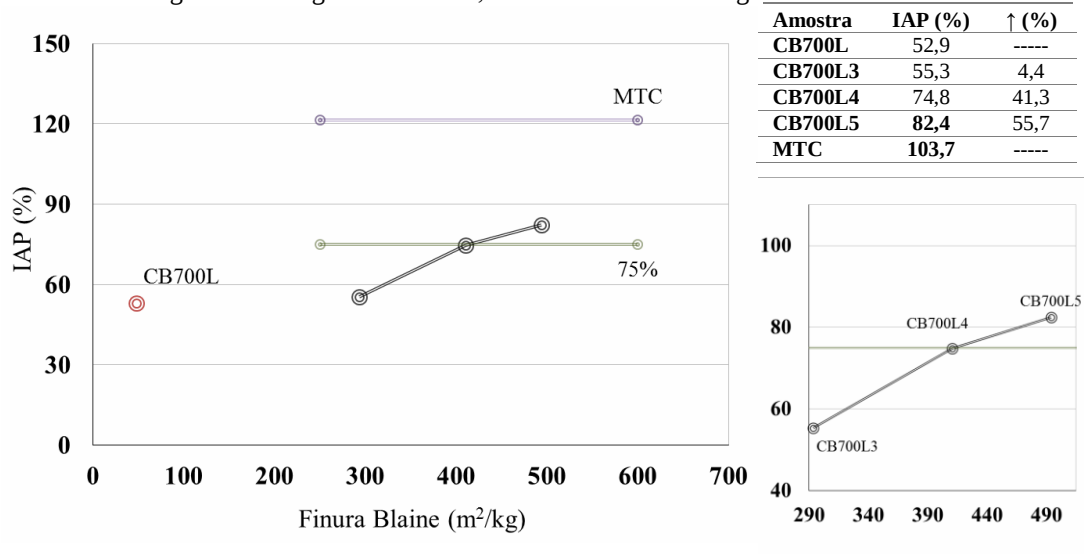
À medida que se aumentou o grau de moagem da CBCA, houve um aumento do IAP independente da temperatura de calcinação das mesmas (Figuras 4.39, Figura 4.40 e Figura 4.41).

Figura 4.39 – Índice de atividade pozolânica (IAP) com cimento Portland da CBCA calcinada à 600°C , resfriada lentamente e com os graus de moagem de 300 ± 20 , 400 ± 20 e 500 ± 20 m^2/kg . ABNT NBR 5752:1992 Modificada.



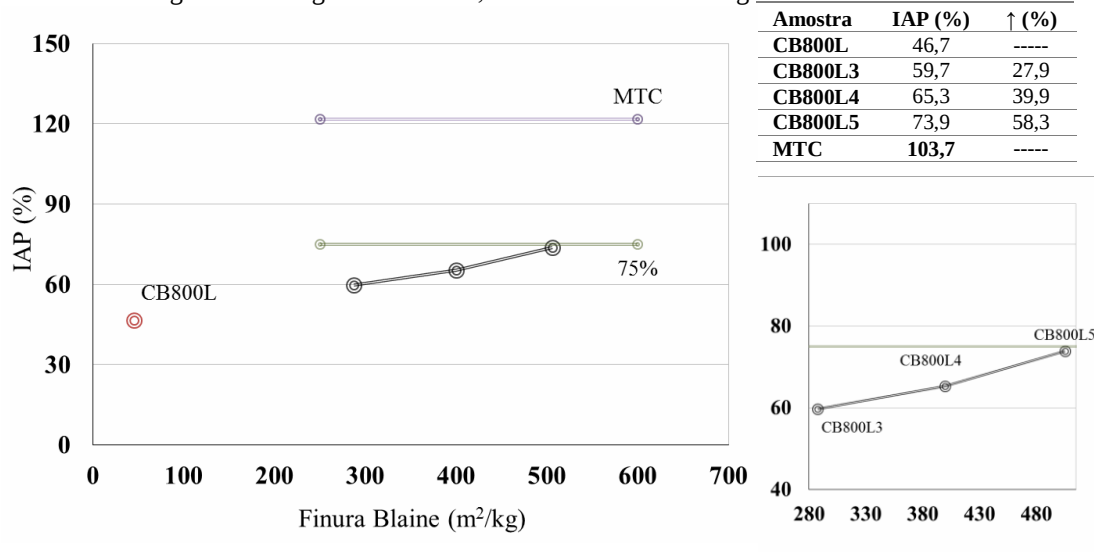
Fonte: Acervo Antônio Acácio de Melo Neto.

Figura 4.40 – Índice de atividade pozolânica (IAP) com cimento Portland da CBCA calcinada à 700°C, resfriada lentamente e com os graus de moagem de 300±20, 400±20 e 500±20 m²/kg. ABNT NBR 5752:1992 Modificada.



Fonte: Acervo Antônio Acácio de Melo Neto.

Figura 4.41 – Índice de atividade pozolânica (IAP) com cimento Portland da CBCA calcinada à 800°C, resfriada lentamente e com os graus de moagem de 300±20, 400±20 e 500±20 m²/kg. ABNT NBR 5752:1992 Modificada.

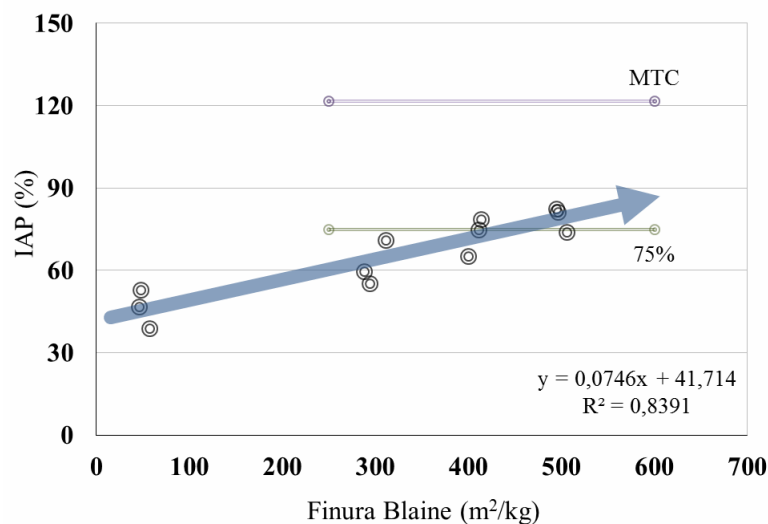


Fonte: Acervo Antônio Acácio de Melo Neto.

Contudo, nas cinzas calcinadas a 700°C se observa uma diferença mais acentuada de IAP entre as cinzas com graus de moagem de 300±20 e 400±20m²/kg. Este fato pode indicar a presença de sílica reativa. A modificação da NBR 5752:1992 trouxe uma clara melhoria do IAP onde foi utilizado o aditivo, principalmente nas CBCA sem moer e com finura Blaine 300±20m²/kg. Este fato demonstra que as críticas ao método são embasadas e realmente prejudicam a análise da pozolanicidade. Mantendo a tendência observada neste trabalho, existe uma correlação entre o aumento da finura Blaine e o aumento do IAP (Figura 4.42) quando da aplicação da modificação da NBR 5752:1992. Porém, ressalta-se o aumento do

número de amostras de CBCA que conseguiu ultrapassar o limite de 75% no valor do IAP para ser considerado pozolânico.

Figura 4.42 – Índice de atividade pozolânica (IAP) com cimento Portland da CBCA versus a finura Blaine. Todas as amostras. ABNT NBR 5752:1992 Modificada. Calcinação seguida de resfriamento lento.

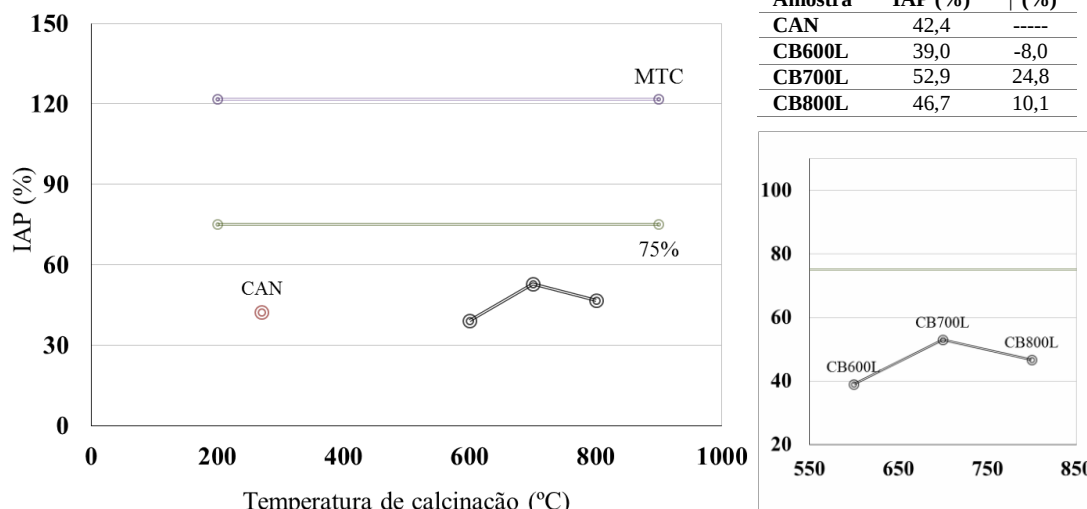


Fonte: Acervo Antônio Acácio de Melo Neto.

CBCA resfriada lentamente - Efeito da calcinação

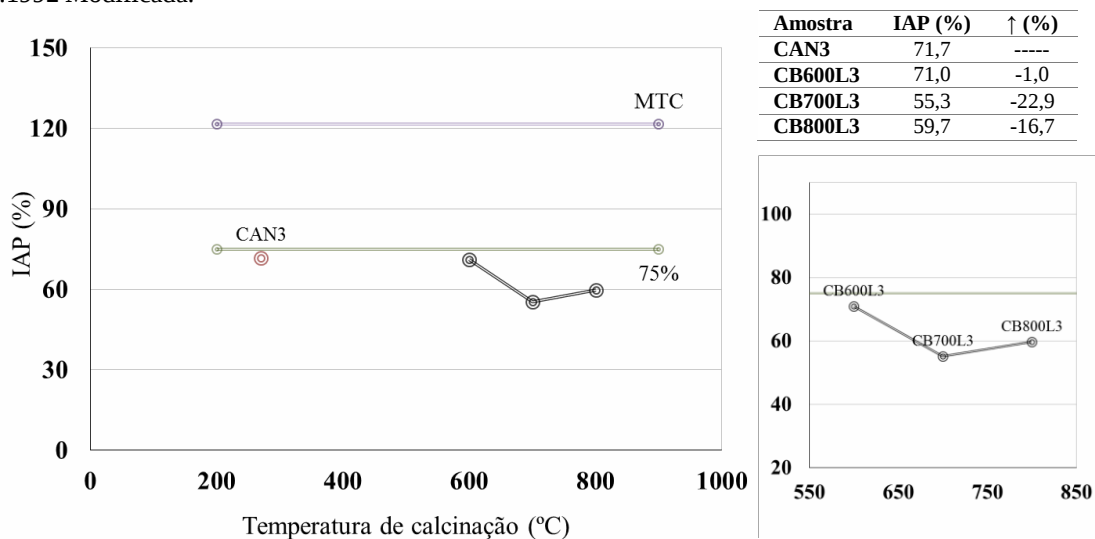
Na CBCA “in natura”, sem moagem, a calcinação a 700°C gerou um ganho de quase 25% no seu IAP quando a NBR 5752:1992 foi modificada, e a calcinação a 800°C levou a um aumento de 10% do seu IAP. Porém, nas demais amostras de cinza e temperaturas de queima houve um decréscimo do IAP ou um ganho muito sutil, inferior a 3%. O fato de a calcinação levar a redução do IAP das cinzas indica conversão da sílica presente na CBCA para o estado cristalino devido a altas temperaturas. Os resultados da NBR 5752:1992 Modificada divergem dos obtidos na NBR 5752:1992 sem alteração, onde a calcinação a 600°C e 700°C gerou um expressivo aumento do IAP das cinzas.

Figura 4.43 – Índice de atividade pozolânica (IAP) com cimento Portland da CBCA “in natura” e calcinada nas temperaturas de 600, 700 e 800°C com resfriamento lento. Sem moagem. ABNT NBR 5752:1992 Modificada.



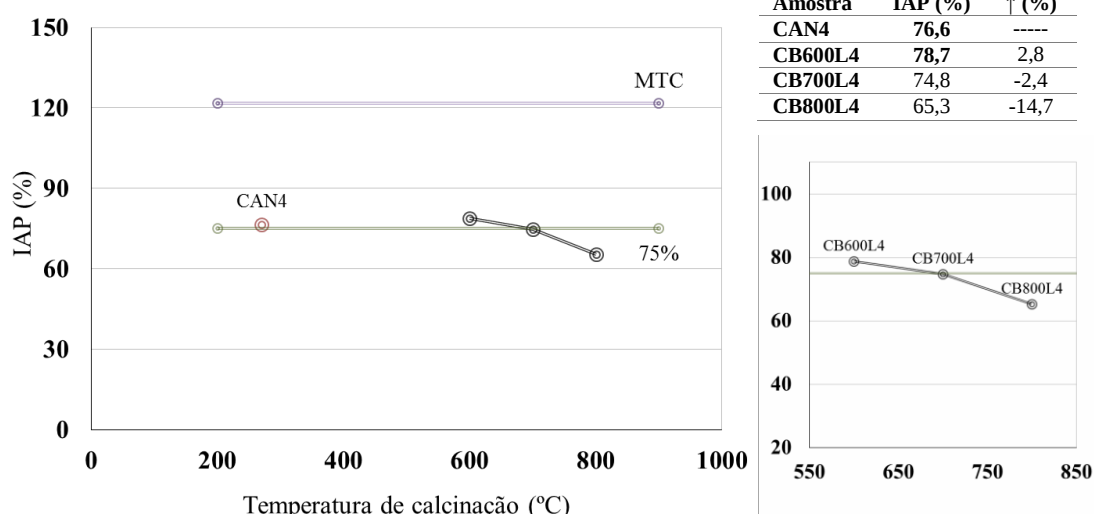
Fonte: Acervo Antônio Acácio de Melo Neto.

Figura 4.44 – Índice de atividade pozolânica (IAP) com cimento Portland da CBCA “in natura” e calcinada nas temperaturas de 600, 700 e 800°C com resfriamento lento. Grau de moagem de $300 \pm 20 \text{ m}^2/\text{kg}$. ABNT NBR 5752:1992 Modificada.



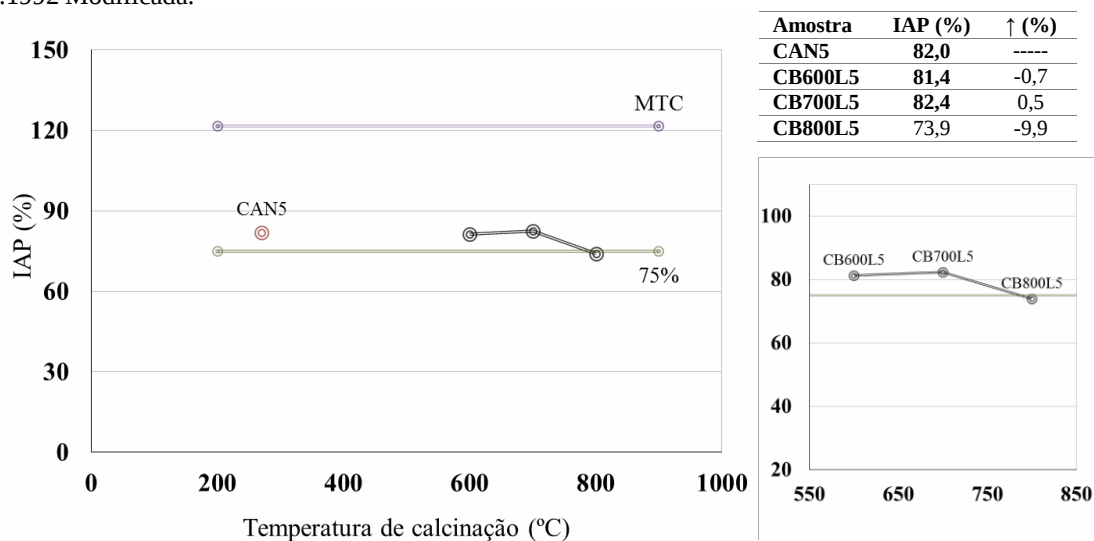
Fonte: Acervo Antônio Acácio de Melo Neto.

Figura 4.45 – Índice de atividade pozolânica (IAP) com cimento Portland da CBCA “in natura” e calcinada nas temperaturas de 600, 700 e 800°C com resfriamento lento. Grau de moagem de $400 \pm 20 \text{ m}^2/\text{kg}$. ABNT NBR 5752:1992 Modificada.



Fonte: Acervo Antônio Acácio de Melo Neto.

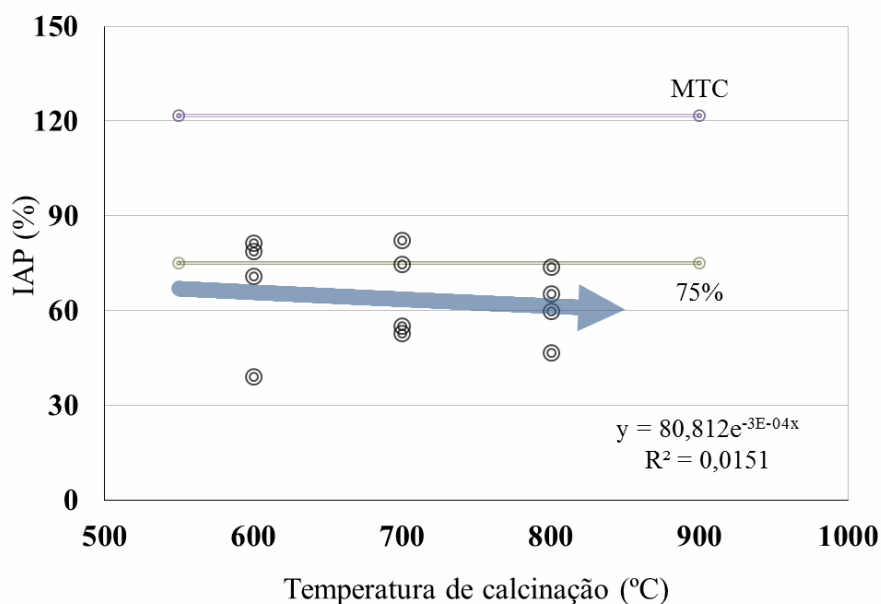
Figura 4.46 – Índice de atividade pozolânica (IAP) com cimento Portland da CBCA “in natura” e calcinada nas temperaturas de 600, 700 e 800°C com resfriamento lento. Grau de moagem de $500 \pm 20 \text{ m}^2/\text{kg}$. ABNT NBR 5752:1992 Modificada.



Fonte: Acervo Antônio Acácio de Melo Neto.

Mantendo o comportamento observado na NBR 5752:1992 sem modificação, observa-se que não houve uma correlação entre o aumento do IAP e a temperatura de calcinação (Figura 4.47). Portanto, mesmo com a manutenção da relação água/aglomerante utilizando aditivos, a temperatura de calcinação não contribuiu para o aumento do IAP.

Figura 4.47 – Índice de atividade pozolânica (IAP) com cimento Portland da CBCA versus a temperatura de calcinação. Todas as amostras. ABNT NBR 5752:1992 Modificada. Calcinação seguida de resfriamento lento.

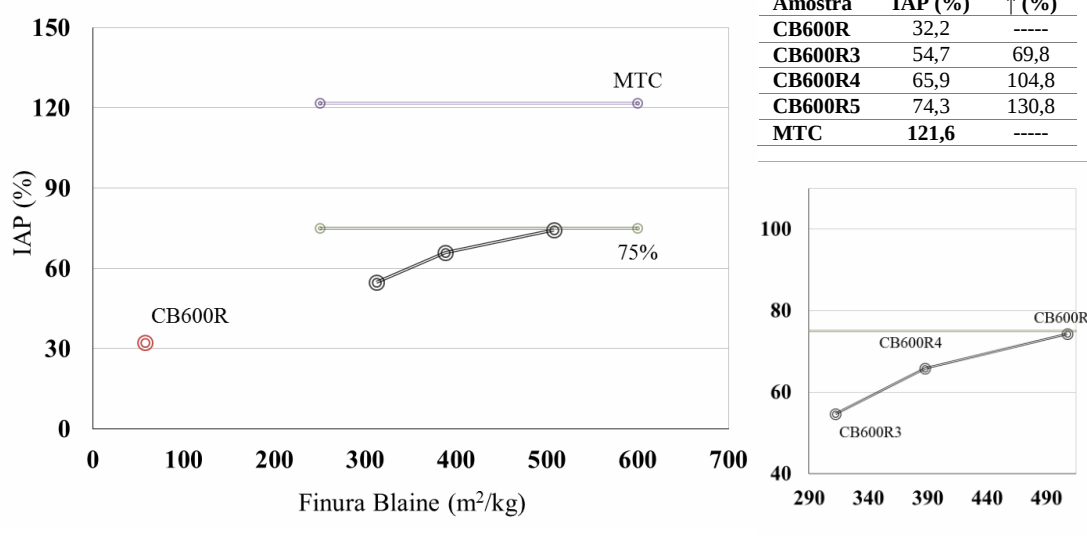


Fonte: Acervo Antônio Acácio de Melo Neto.

CBCA resfriada rapidamente - Efeito da moagem

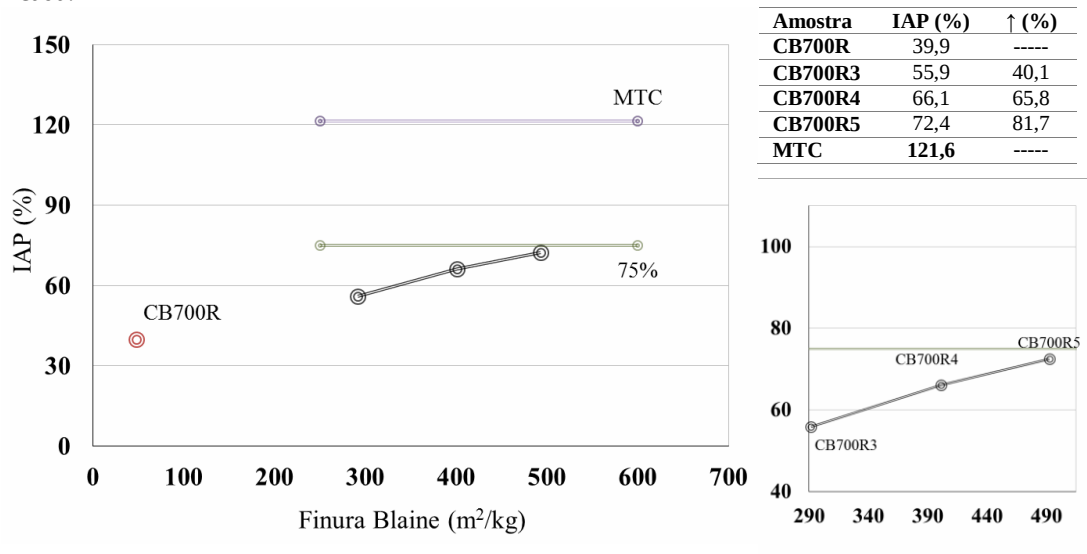
Na cinza sem calcinação e nas cinzas com diferentes temperaturas de queima a moagem levou a um aumento do IAP, sendo as cinzas com finura de $500 \pm 20 \text{ m}^2/\text{kg}$ as que apresentaram melhores resultados. As cinzas calcinadas a 600°C foram as que tiveram um aumento mais significativo com a moagem, chegando a 130% de acréscimo do seu IAP. Contudo, nenhuma das amostras de cinza com resfriamento rápido conseguiu alcançar o IAP de 75% previsto na NBR 5752:1992.

Figura 4.48 – Índice de atividade pozolânica (IAP) com cimento Portland da CBCA calcinada à 600°C, resfriada rapidamente e com os graus de moagem de 300±20, 400±20 e 500±20 m²/kg. ABNT NBR 5752:1992 Modificada.



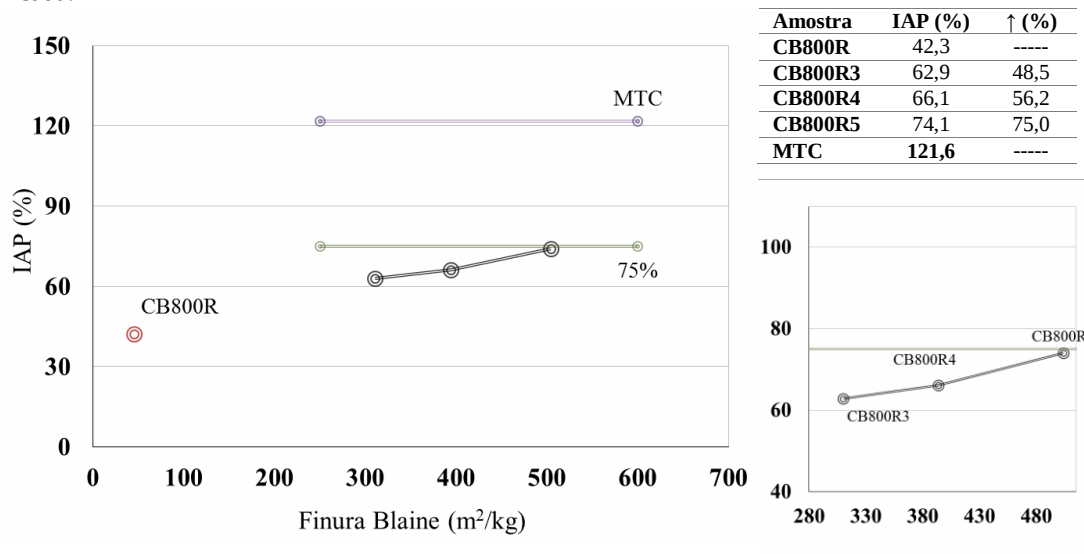
Fonte: Acervo Antônio Acácio de Melo Neto.

Figura 4.49 – Índice de atividade pozolânica (IAP) com cimento Portland da CBCA calcinada à 700°C, resfriada rapidamente e com os graus de moagem de 300±20, 400±20 e 500±20 m²/kg. ABNT NBR 5752:1992 Modificada.



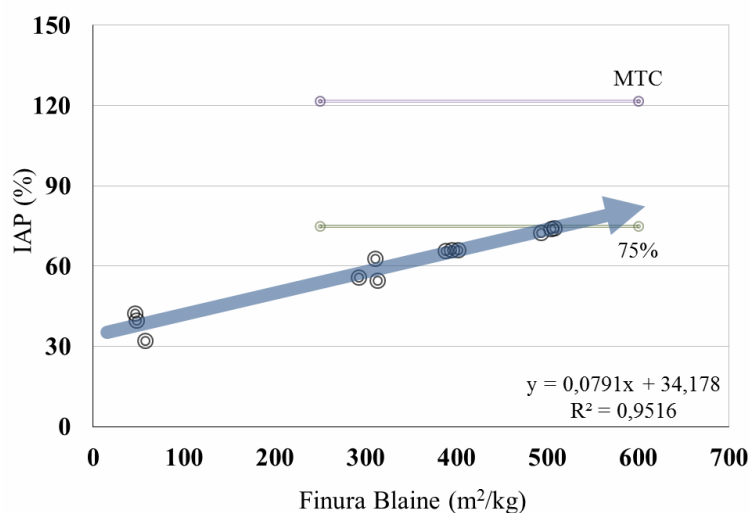
Fonte: Acervo Antônio Acácio de Melo Neto.

Figura 4.50 – Índice de atividade pozolânica (IAP) com cimento Portland da CBCA calcinada à 800°C, resfriada rapidamente e com os graus de moagem de 300±20, 400±20 e 500±20 m²/kg. ABNT NBR 5752:1992 Modificada.



Fonte: Acervo Antônio Acácio de Melo Neto.

Figura 4.51 – Índice de atividade pozolânica (IAP) com cimento Portland da CBCA versus a finura Blaine. Todas as amostras. ABNT NBR 5752:1992 Modificada. Calcinção seguida de resfriamento rápido.

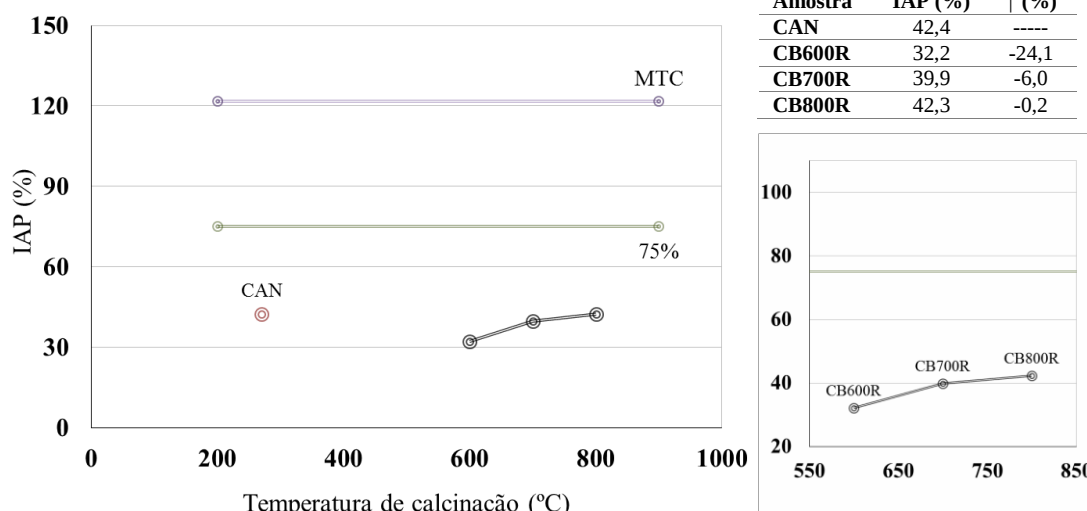


Fonte: Acervo Antônio Acácio de Melo Neto.

CBCA resfriada rapidamente - Efeito da calcinação

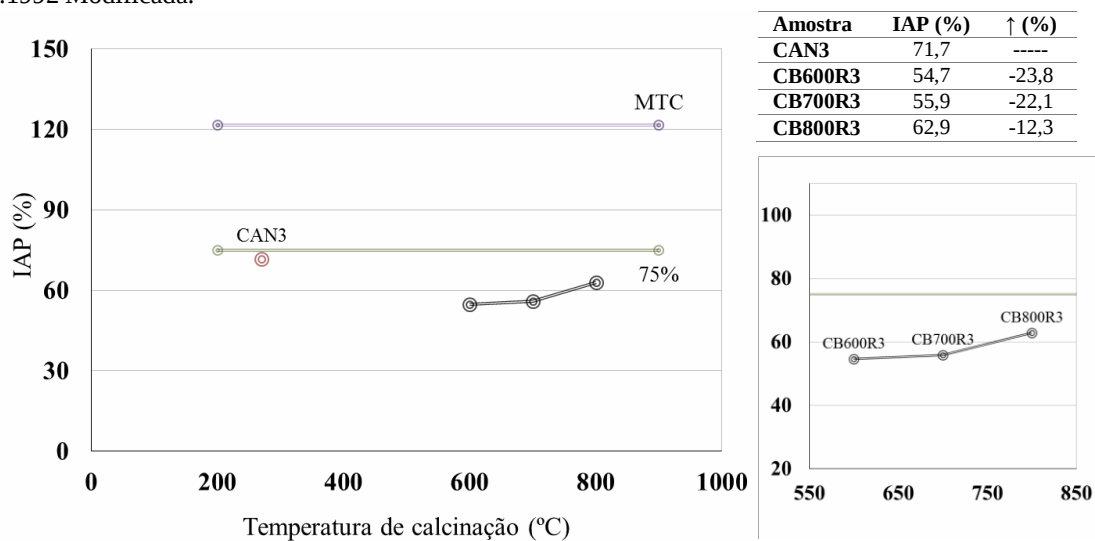
As amostras que tiveram tratamento térmico tiveram a redução do seu IAP se comparadas com a CBCA “in natura”, de forma que nenhuma das cinzas calcinadas alcançou o valor de 75% de IAP previsto em norma. Dentre as cinzas calcinadas a que obteve melhor resultado foi à queimada a 600°C. A redução do IAP após a calcinação pode ser explicado pela conversão da sílica amorfa presente na cinza “in natura” pela sílica no estado cristalino após ser submetida a altas temperaturas.

Figura 4.52 – Índice de atividade pozolânica (IAP) com cimento Portland da CBCA “in natura” e calcinadas nas temperaturas de 600, 700 e 800°C com resfriamento rápido. Sem moagem. ABNT NBR 5752:1992 Modificada.



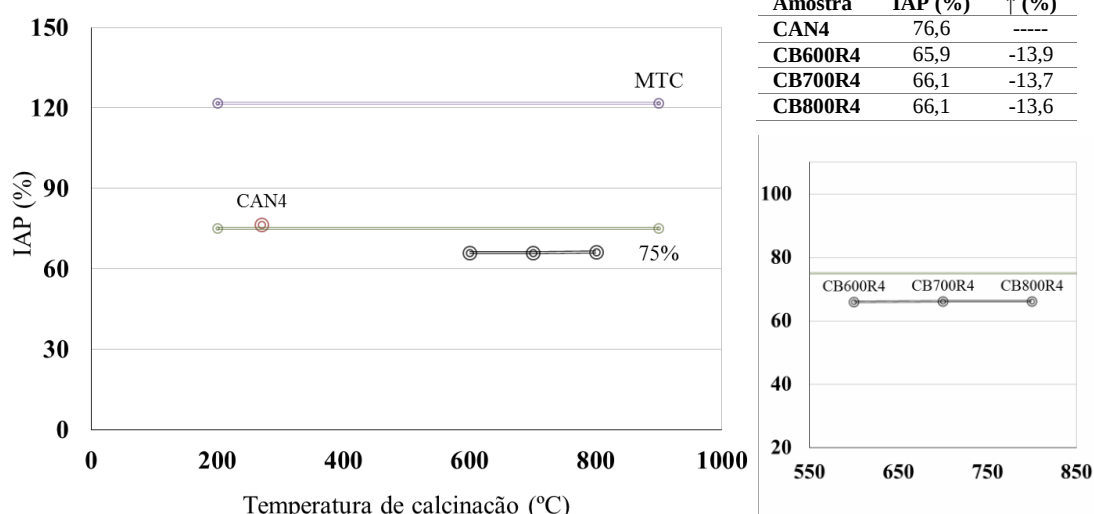
Fonte: Acervo Antônio Acácio de Melo Neto.

Figura 4.53 – Índice de atividade pozolânica (IAP) com cimento Portland da CBCA “in natura” e calcinadas nas temperaturas de 600, 700 e 800°C com resfriamento rápido. Grau de moagem de $300 \pm 20 \text{ m}^2/\text{kg}$. ABNT NBR 5752:1992 Modificada.



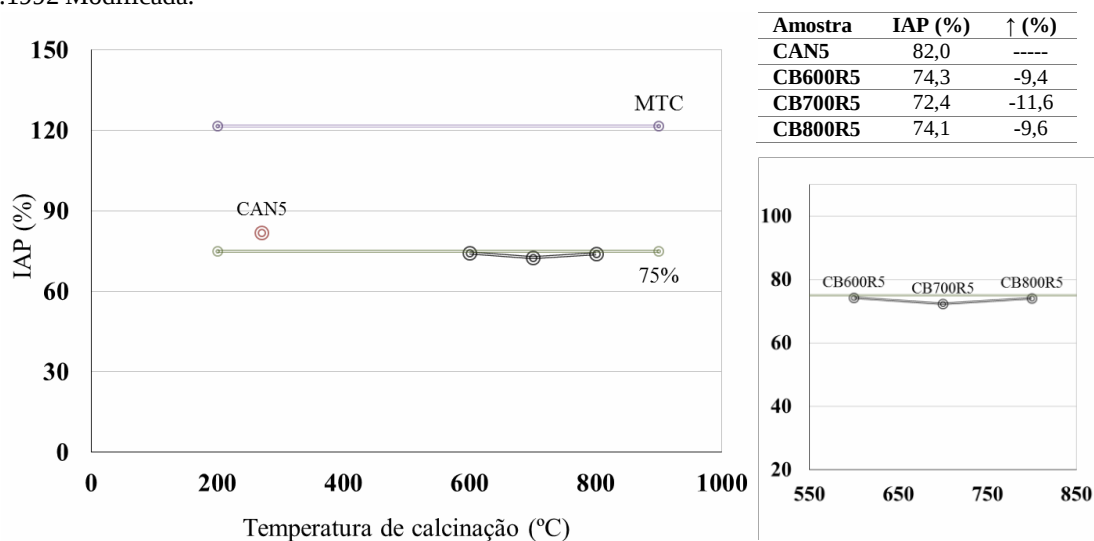
Fonte: Acervo Antônio Acácio de Melo Neto.

Figura 4.54 – Índice de atividade pozolânica (IAP) com cimento Portland da CBCA “in natura” e calcinadas nas temperaturas de 600, 700 e 800°C com resfriamento rápido. Grau de moagem de $400 \pm 20 \text{ m}^2/\text{kg}$. ABNT NBR 5752:1992 Modificada.



Fonte: Acervo Antônio Acácio de Melo Neto.

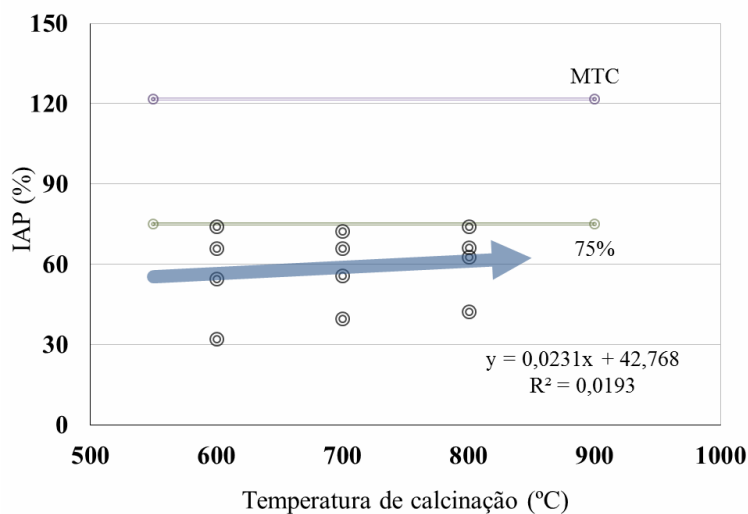
Figura 4.55 – Índice de atividade pozolânica (IAP) com cimento Portland da CBCA “in natura” e calcinadas nas temperaturas de 600, 700 e 800°C com resfriamento rápido. Grau de moagem de $500 \pm 20 \text{ m}^2/\text{kg}$. ABNT NBR 5752:1992 Modificada.



Fonte: Acervo Antônio Acácio de Melo Neto.

A NBR 5752:1992 modificada não apresentou efeito significativo na CBCA com resfriamento rápido, porém, atribui-se este comportamento ao aumento significativo da cristalinidade com este tipo de tratamento. Com isto, é possível que a modificação da NBR 5752:1992 tenha sido encoberta pelo efeito de maior significância que é a redução da amorficidade.

Figura 4.56 – Índice de atividade pozolânica (IAP) com cimento Portland da CBCA versus a temperatura de calcinação. Todas as amostras. ABNT NBR 5752:1992 Modificada. Calcinação seguida de resfriamento rápido.



Fonte: Acervo Antônio Acácio de Melo Neto.

4.4 ABNT NBR 5751:1992

As tabelas abaixo trazem os resultados dos ensaios da norma ABNT NBR 5751:1992 para a CBCA com diferentes tratamentos e do metacaulim que serviu como pozolana de referência. De acordo com Tabela 4.9, observa-se que o metacaulim alcançou mais do que o dobro da resistência mecânica à compressão prevista na NBR 5751:1992 (6 MPa), mesmo apresentando uma relação água/aglomerante superior ao da mistura de referência, reiterando seu excelente potencial como adição já averiguado nos ensaios anteriores.

Já o IAC dos diferentes tipos de cinza, ficou muito abaixo do estabelecido pela NBR 5751:1992. Nenhuma das amostras de CBCA chegou nem na metade da resistência à compressão de 6 MPa, sendo as cinzas com maior grau de moagem as que apresentaram melhores resultados. Estes resultados obtidos nos ensaios com cal hidratada indicam a não pozolanicidade da cinza de bagaço de cana divergindo, portanto, dos resultados obtidos através da NBR 5752:1992. Ressalta-se que a variação da relação água/aglomerante para a manutenção da consistência influenciou os resultados da CBCA sem moagem, independentemente da temperatura de calcinação e do tipo de resfriamento.

Tabela 4.9 - Quadro resumo das propriedades da argamassa de cal hidratada com metacaulim. Moldagem de 6 corpos-de-prova.

Mistura	Ca(OH) ₂ (g)	MTC (g)	Areia (g)	Água (g)	Consistência média (mm)	a/agl	Resist.Comp. (MPa)	IAC (%)
MTC	208,00	485,62	1872,00	635,35	220	0,916	13,28	221,28

Fonte: Acervo Antônio Acácio de Melo Neto.

Tabela 4.10 - Quadro resumo das propriedades das argamassas de cal hidratada com cinza do bagaço de cana-de-açúcar. Resfriamento lento. Moldagem de 6 corpos-de-prova.

Mistura	Ca(OH) ₂ (g)	CBCA (g)	Areia (g)	Água (g)	Consistência média (mm)	a/agl	Resist.Comp. (MPa)	IAC (%)
CAN	208,00	494,54	1872,00	500,94	220	0,713	0,30	4,99
CAN3		494,54		410,63	229	0,584	1,31	21,78
CAN4		494,54		406,31	229	0,578	1,74	29,00
CAN5		494,54		404,23	228	0,575	2,76	45,92
CB600L	208,00	499,77	1872,00	507,96	222	0,718	0,38	6,38
CB600L3		499,64		418,89	229	0,592	2,06	34,27
CB600L4		500,57		405,58	230	0,572	2,21	36,90
CB600L5		499,76		401,44	224	0,567	2,82	47,03
CB700L	208,00	497,98	1872,00	493,58	222	0,699	0,22	3,61
CB700L3		496,04		404,81	223	0,575	1,22	20,39
CB700L4		510,02		409,70	228	0,571	2,28	38,01
CB700L5		503,00		402,20	224	0,566	2,34	38,98
CB800L	208,00	501,58	1872,00	494,66	220	0,697	0,20	3,33
CB800L3		500,13		394,86	224	0,558	0,93	15,54
CB800L4		499,35		399,30	227	0,564	1,79	29,83
CB800L5		503,72		405,68	229	0,570	2,11	35,10

Fonte: Acervo Antônio Acácio de Melo Neto.

Tabela 4.11 - Quadro resumo das propriedades das argamassas de cal hidratada com cinza do bagaço de cana-de-açúcar. Resfriamento rápido. Moldagem de 6 corpos-de-prova.

Mistura	Ca(OH) ₂ (g)	CBCA (g)	Areia (g)	Água (g)	Consistência média (mm)	a/agl	Resist.Comp. (MPa)	IAC (%)
CAN	208,00	494,54	1872,00	500,94	220	0,713	0,30	4,99
CAN3		494,54		410,63	229	0,584	1,31	21,78
CAN4		494,54		406,31	229	0,578	1,74	29,00
CAN5		494,54		404,23	228	0,575	2,76	45,92
CB600R	208,00	493,33	1872,00	399,76	223	0,570	0,23	3,88
CB600R3		506,64		407,34	224	0,570	1,17	19,42
CB600R4		501,48		404,40	230	0,570	1,63	27,19
CB600R5		505,87		406,90	229	0,570	2,49	41,48
CB700R	208,00	494,24	1872,00	400,27	223	0,570	0,20	3,33
CB700R3		489,44		397,54	227	0,570	1,22	20,26
CB700R4		494,50		400,43	223	0,570	2,16	35,93
CB700R5		494,90		400,65	224	0,570	2,73	45,51
CB800R	208,00	494,93	1872,00	407,70	221	0,580	0,22	3,75
CB800R3		491,38		398,65	225	0,570	0,99	16,51
CB800R4		502,68		405,09	226	0,570	1,92	32,05
CB800R5		494,21		400,26	228	0,570	2,66	44,40

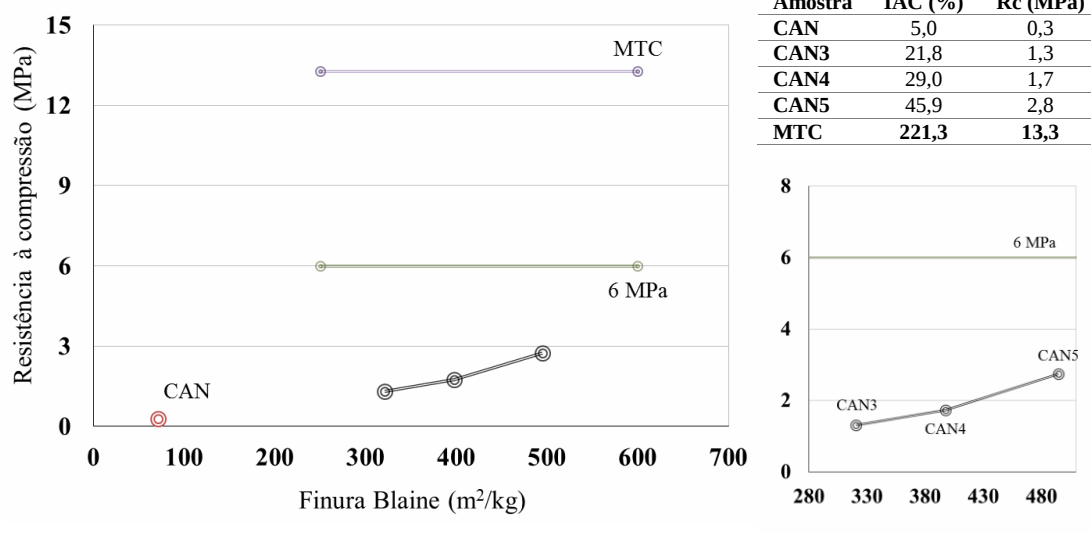
Fonte: Acervo Antônio Acácio de Melo Neto.

Mesmo com os resultados abaixo do exigido pela NBR 12653:1992 (6MPa), cabe salientar que neste ensaio específico a resistência obtida pode ser atribuída predominantemente ao efeito pozolânico, pois o ganho de resistência só é possível com a formação de produtos hidratados resistentes. Lembra-se que o efeito fíler tem contribuição na resistência mecânica por meio do aumento da compacidade e, principalmente, pela colmatação dos poros em razão do efeito de nucleação de produtos hidratados sobre as partículas de menores dimensões. Portanto, no método descrito na NBR 5751:1992, a única fonte de produtos hidratados é oriunda da reação entre a cal hidratada e o material a ser testado. Portanto, existe a reação pozolânica; porém a mesma não é extensa o bastante para atingir o exigido pela normatização.

CBCA “in natura” - Efeito da moagem

A redução das partículas da CBCA “in natura” por moagem gerou ganhos de resistência mecânica nos corpos de provas produzidos. Com o desenvolvimento da análise deste trabalho, pode-se afirmar que este comportamento já era esperado, pois partículas menores são mais reativas. Os resultados do IAC corroboram para fundamentar que a moagem é essencial para o material pozolânico, influenciando tanto no efeito fíler verificado pela NBR 5752:1992 como na atividade pozolânica verificada na NBR 5751:1992

Figura 4.57 – Resistência à compressão (ABNT NBR 5751:1992) da CBCA “in natura” e submetida aos graus de moagem de 300 ± 20 , 400 ± 20 e 500 ± 20 m^2/kg .

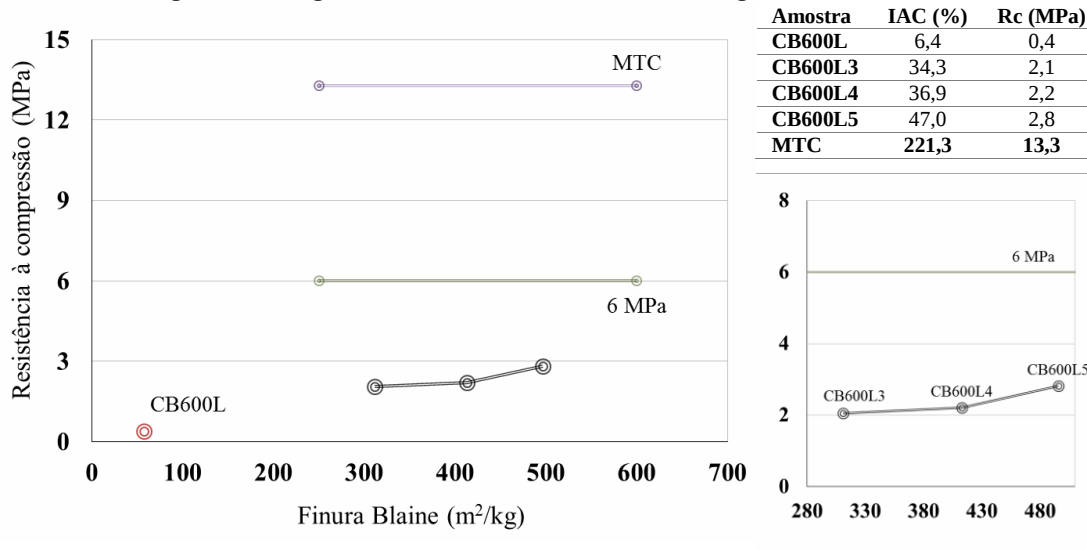


Fonte: Acervo Antônio Acácio de Melo Neto.

CBCA resfriada lentamente - Efeito da moagem

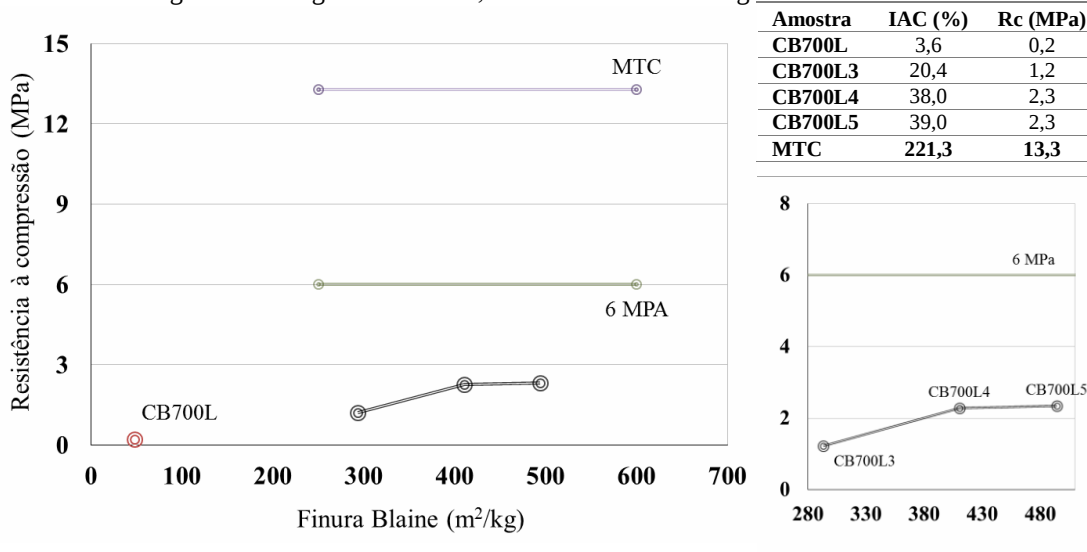
De modo geral, a moagem teve efeito característico de melhorar o IAC na temperatura de calcinação de $600^{\circ}C$ de forma mais significativa do que nas temperaturas de $700^{\circ}C$ e $800^{\circ}C$. Partindo desta afirmação, a redução das partículas da CBCA por moagem contribui de forma significativa no ganho de resistência mecânica nos corpos de provas produzidos com cal hidratada. Contudo é importante ressaltar que nas cinzas calcinadas a $700^{\circ}C$ e $800^{\circ}C$ o IAC foi praticamente mantido para os graus de moagem de 400 ± 20 e 500 ± 20 m^2/kg .

Figura 4.58 – Resistência à compressão (ABNT NBR 5751:1992) da CBCA calcinada à 600°C, resfriada lentamente e com os graus de moagem de 300±20, 400±20 e 500±20 m²/kg.



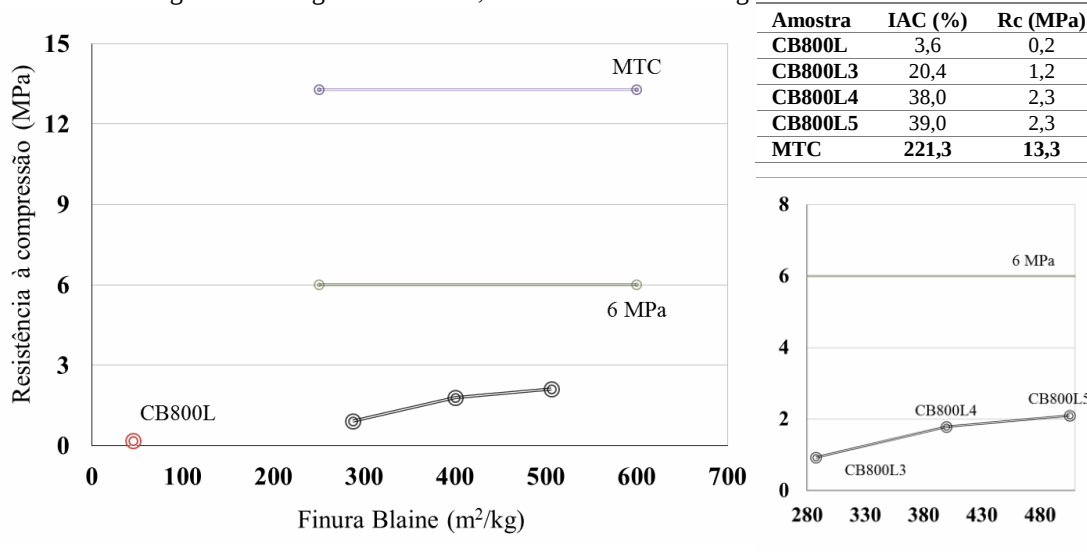
Fonte: Acervo Antônio Acácio de Melo Neto.

Figura 4.59 – Resistência à compressão (ABNT NBR 5751:1992) da CBCA calcinada à 700°C, resfriada lentamente e com os graus de moagem de 300±20, 400±20 e 500±20 m²/kg.



Fonte: Acervo Antônio Acácio de Melo Neto.

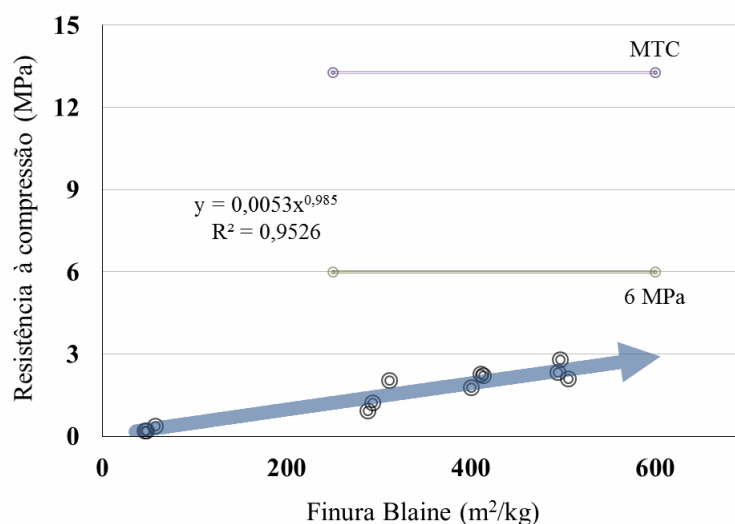
Figura 4.60 – Resistência à compressão (ABNT NBR 5751:1992) da CBCA calcinada à 800°C, resfriada lentamente e com os graus de moagem de 300±20, 400±20 e 500±20 m²/kg.



Fonte: Acervo Antônio Acácio de Melo Neto.

Com a relação entre a resistência à compressão e a finura Blaine, confirma-se que o aumento da finura provoca o aumento do IAC, porém, ainda distante do limite de 6 MPa exigido pela NBR 12653:1992. Em uma simplificação, é possível utilizar a equação resultante do ajuste da correlação apresentada na Figura 4.61 para estimar qual seria a finura Blaine necessária para satisfazer o exigido pela ABNT NBR 12653:1992. O valor de aproximadamente 1260 m²/kg de finura Blaine seria a estimativa para a CBCA atingir 6 MPa de resistência à compressão. Para alcança valores similares ao obtidos com o metacaulim (13,30 MPa), o valor estimado da finura Blaine da CBCA seria em torno de 2800 m²/kg, ressalta-se que a finura Blaine do metacaulim foi em torno de 2245 m²/kg.

Figura 4.61 – Resistência à compressão (ABNT NBR 5751:1992) da CBCA versus a finura Blaine. Todas as amostras. Calcinação seguida de resfriamento lento.



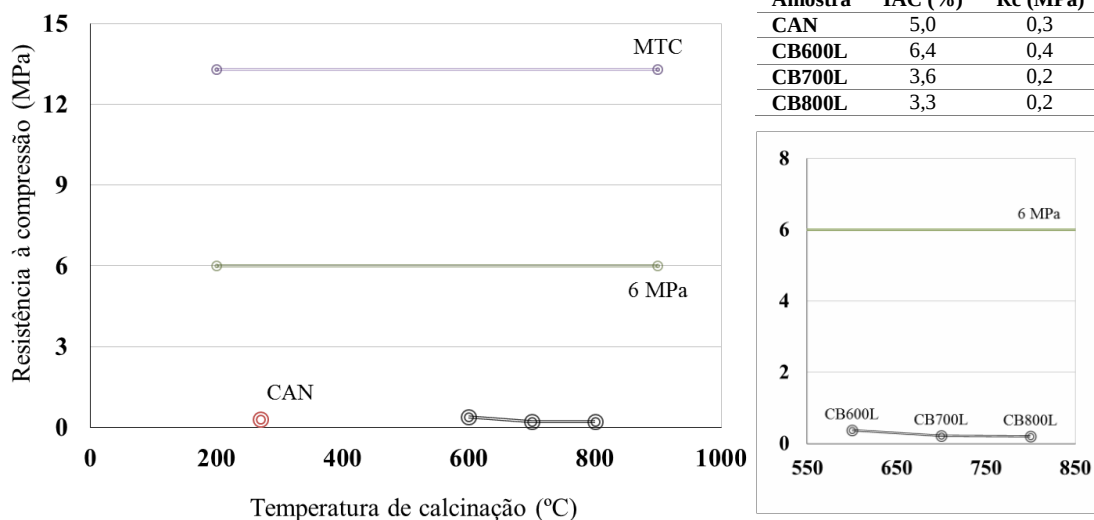
Fonte: Acervo Antônio Acácio de Melo Neto.

CBCA resfriada lentamente - Efeito da calcinação

Os resultados da CBCA utilizando a NBR 5751:1992 definem claramente que os níveis de calcinação utilizados neste trabalho não foram satisfatórios em melhorar a atividade pozolânica da CBCA, sendo observado o efeito contrário com a diminuição do IAC. Na CBCA “in natura” e na CBCA com aplicação de grau de moagem de $300 \pm 20 \text{ m}^2/\text{kg}$ calcinada à 600°C foram as que apresentaram maiores valores de IAC. Já as cinzas com grau de moagem de $400 \pm 20 \text{ m}^2/\text{kg}$ e $500 \pm 20 \text{ m}^2/\text{kg}$ tiveram melhores resultados com a calcinação a 700°C .

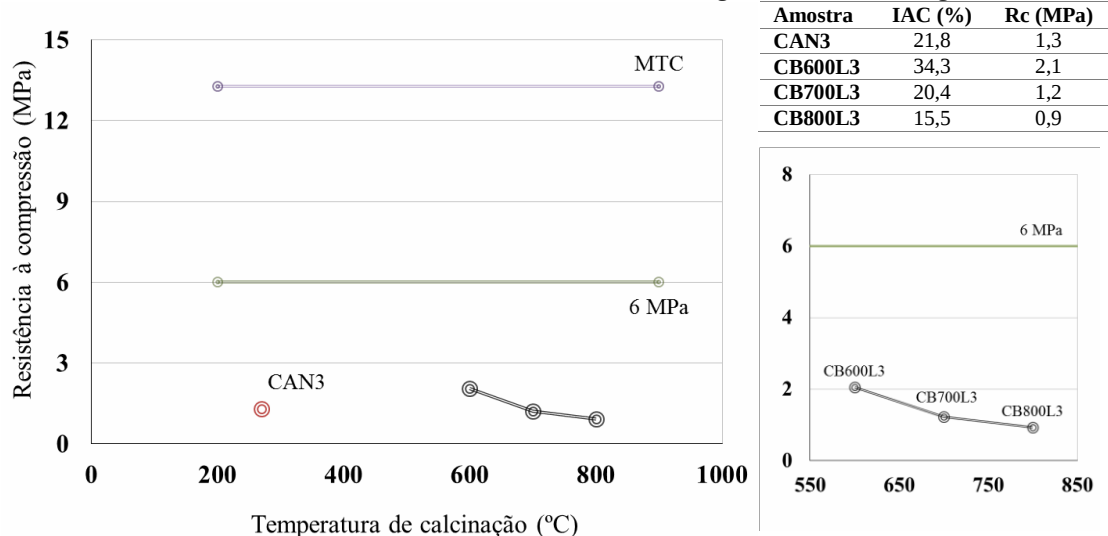
De uma forma geral (Figuras 4.62, Figura 4.63, Figura 4.64 e Figura 4.65), há uma tendência da redução da IAC com o aumento da temperatura de calcinação, sendo a temperatura de 800°C a com piores resultados. Mais uma vez se evidencia a formação de sílica cristalina diante de altas temperaturas, reduzindo assim a reatividade de cinza.

Figura 4.62 – Resistência à compressão (ABNT NBR 5751:1992) da CBCA “in natura” e calcinada nas temperaturas de 600, 700 e 800°C com resfriamento lento. Sem moagem.



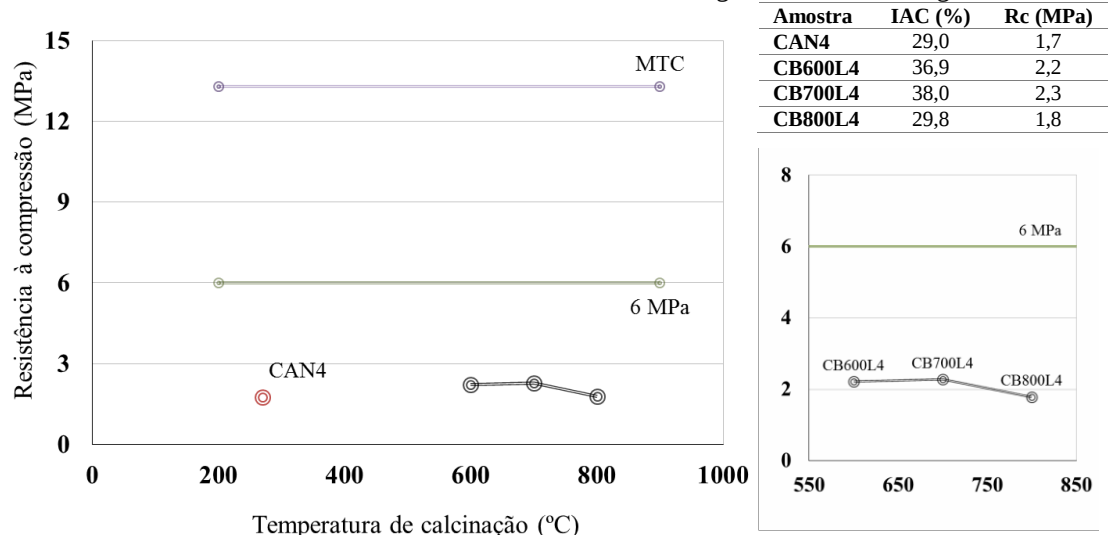
Fonte: Acervo Antônio Acácio de Melo Neto.

Figura 4.63 – Resistência à compressão (ABNT NBR 5751:1992) da CBCA “in natura” e calcinada nas temperaturas de 600, 700 e 800°C com resfriamento lento. Grau de moagem de $300 \pm 20 \text{ m}^2/\text{kg}$.



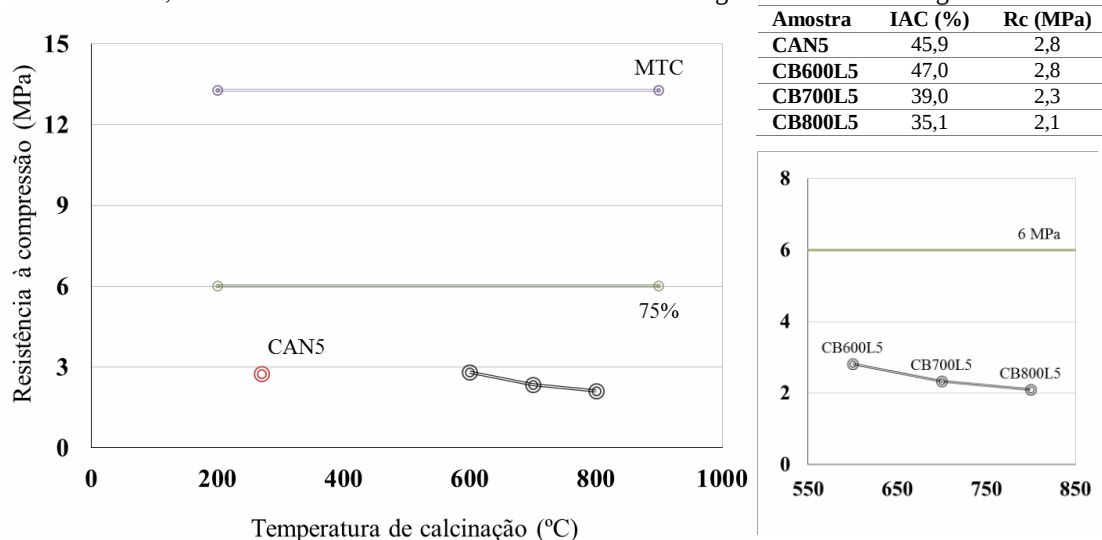
Fonte: Acervo Antônio Acácio de Melo Neto.

Figura 4.64 – Resistência à compressão (ABNT NBR 5751:1992) da CBCA “in natura” e calcinada nas temperaturas de 600, 700 e 800°C com resfriamento lento. Grau de moagem de $400 \pm 20 \text{ m}^2/\text{kg}$.



Fonte: Acervo Antônio Acácio de Melo Neto.

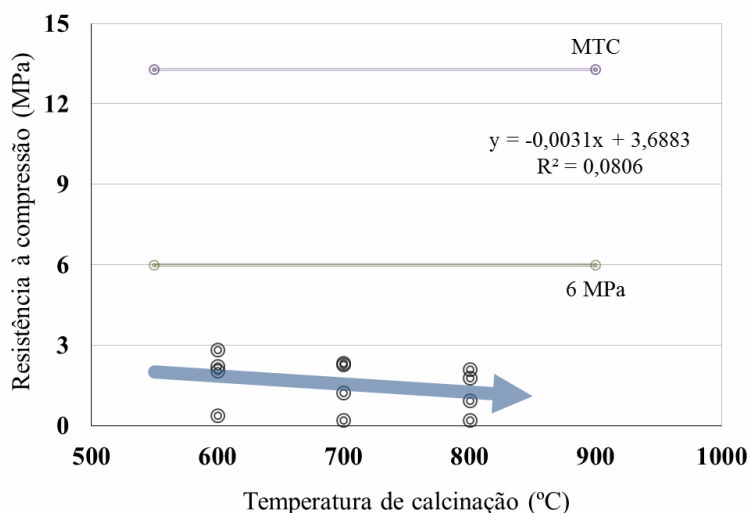
Figura 4.65 – Resistência à compressão (ABNT NBR 5751:1992) da CBCA “in natura” e calcinada nas temperaturas de 600, 700 e 800°C com resfriamento lento. Grau de moagem de $500 \pm 20 \text{ m}^2/\text{kg}$.



Fonte: Acervo Antônio Acácio de Melo Neto.

A correlação entre a resistência à compressão prevista na NBR 5751:1992 e a temperatura de calcinação (Figura 4.66), assim como nas análises anteriores, permite afirmar que o efeito deste tratamento não foi significativo no IAC. Observa-se também uma tendência geral de redução da resistência à compressão com o aumento da temperatura de calcinação.

Figura 4.66 – Resistência à compressão (ABNT NBR 5751:1992) da CBCA versus a temperatura de calcinação. Todas as amostras. Calcinação seguida de resfriamento lento.



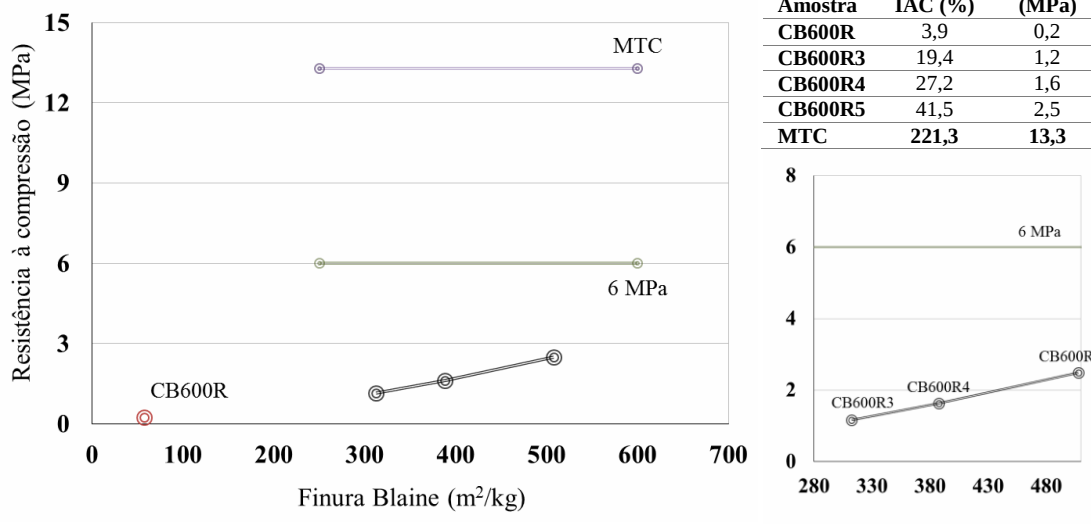
Fonte: Acervo Antônio Acácio de Melo Neto.

CBCA resfriada rapidamente - Efeito da moagem

Em todas as amostras da CBCA com resfriamento rápido, o aumento do grau de moagem levou a um aumento expressivo da resistência mecânica a compressão dos corpos de prova. É possível observar (Figura 4.67, Figura 4.68 e Figura 4.69) uma proporção quase linear entre o

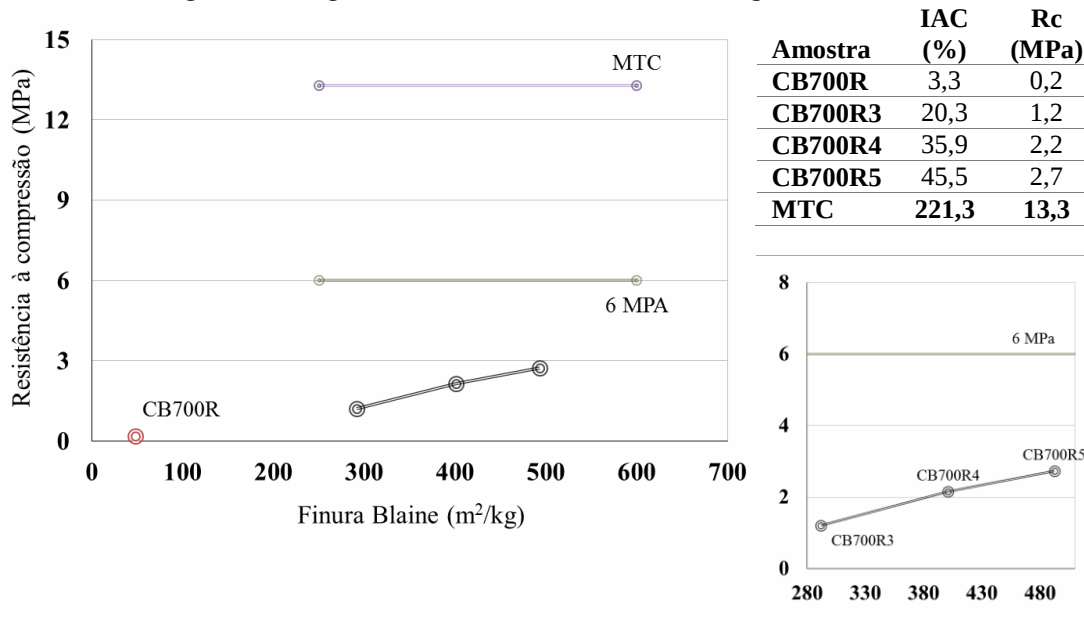
aumento do IAC e do grau de moagem. Esse resultado era esperado, uma vez que, a redução do tamanho das partículas aumenta a reatividade da cinza.

Figura 4.67 – Resistência à compressão (ABNT NBR 5751:1992) da CBCA calcinada à 600°C, resfriada rapidamente e com os graus de moagem de 300 ± 20 , 400 ± 20 e 500 ± 20 m²/kg.



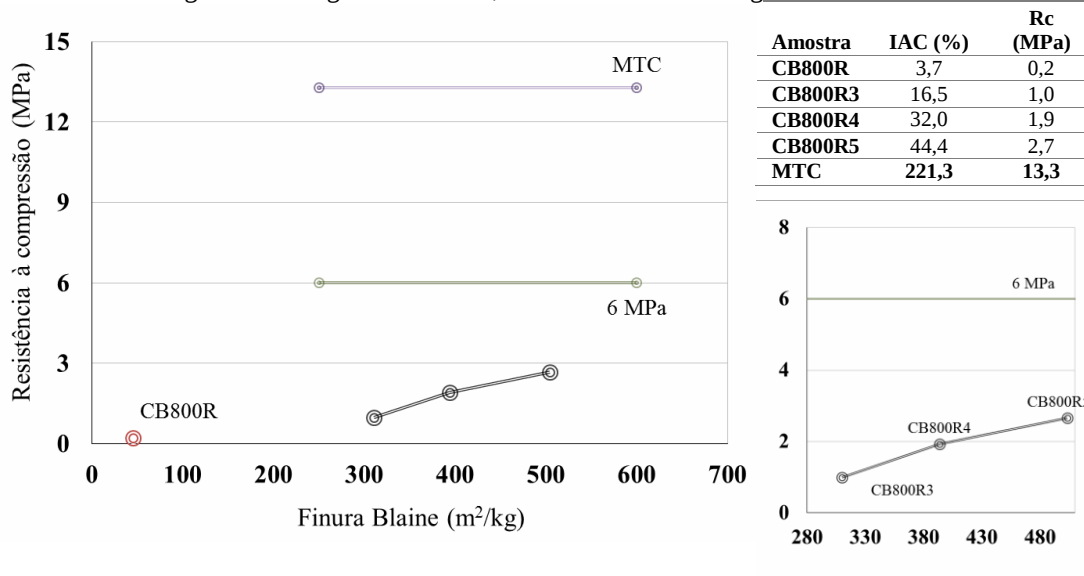
Fonte: Acervo Antônio Acácio de Melo Neto.

Figura 4.68 – Resistência à compressão (ABNT NBR 5751:1992) da CBCA calcinada à 700°C, resfriada rapidamente e com os graus de moagem de 300 ± 20 , 400 ± 20 e 500 ± 20 m²/kg.



Fonte: Acervo Antônio Acácio de Melo Neto.

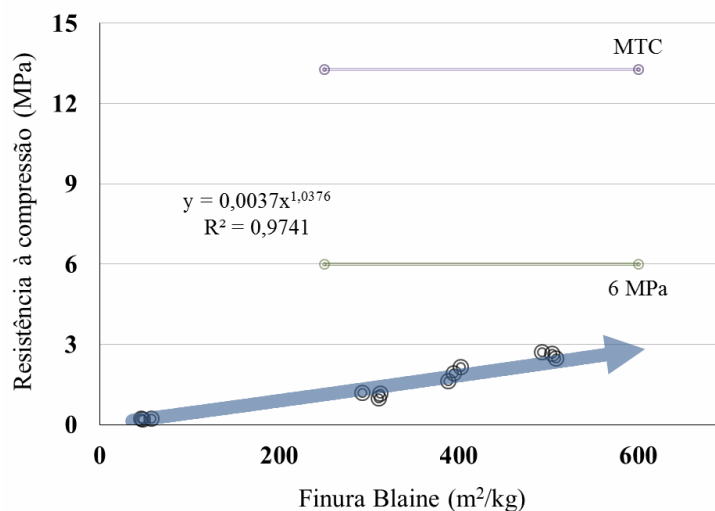
Figura 4.69 – Resistência à compressão (ABNT NBR 5751:1992) da CBCA calcinada à 800°C, resfriada rapidamente e com os graus de moagem de 300 ± 20 , 400 ± 20 e $500 \pm 20 \text{ m}^2/\text{kg}$.



Fonte: Acervo Antônio Acácio de Melo Neto.

Na Figura 4.70 é apresentada a correlação entre a resistência à compressão e a finura Blaine, confirma-se que o aumento da finura provoca o aumento do IAC, porém, ainda distante do limite de 6 MPa exigido pela NBR 12653:1992. Realizando a mesma simplificação utilizada anteriormente, podemos utilizar a equação resultante do ajuste da correlação apresentada na Figura 4.70 para estimar qual seria a finura Blaine necessária para satisfazer o exigido pela NBR 12653:1992. O valor de aproximadamente $1240 \text{ m}^2/\text{kg}$ de finura Blaine seria a estimativa para a CBCA atingir 6 MPa de resistência à compressão. Para alcança valores similares ao obtidos com o metacaulim (13,30 MPa), o valor estimado da finura Blaine da CBCA seria em torno de $2670 \text{ m}^2/\text{kg}$, ressalta-se que a finura Blaine do metacaulim foi em torno de $2245 \text{ m}^2/\text{kg}$.

Figura4.70 – Resistência à compressão (ABNT NBR 5751:1992) da CBCA versus a finura Blaine. Todas as amostras. Calcinação seguida de resfriamento rápido

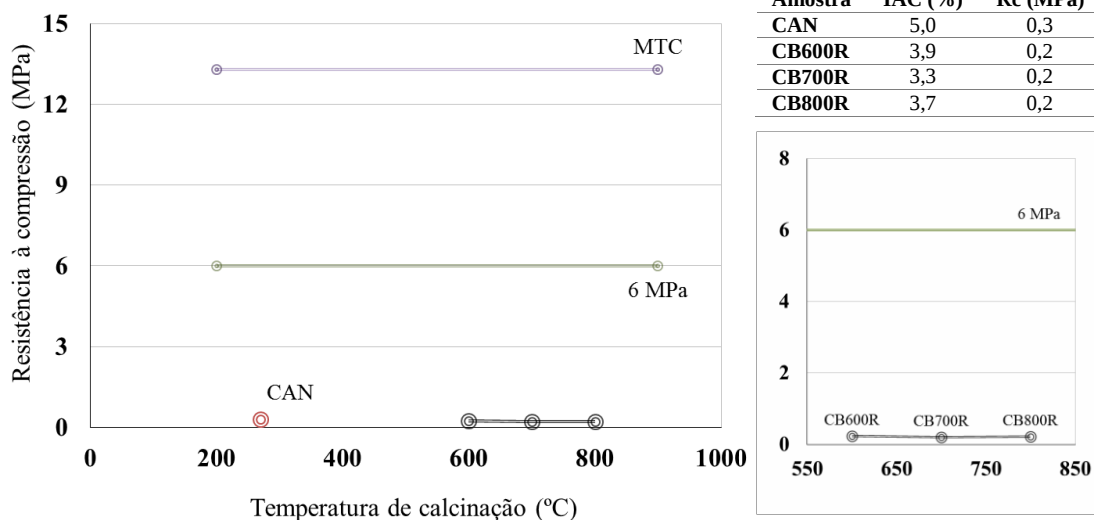


Fonte: Acervo Antônio Acácio de Melo Neto.

CBCA resfriada rapidamente - Efeito da calcinação

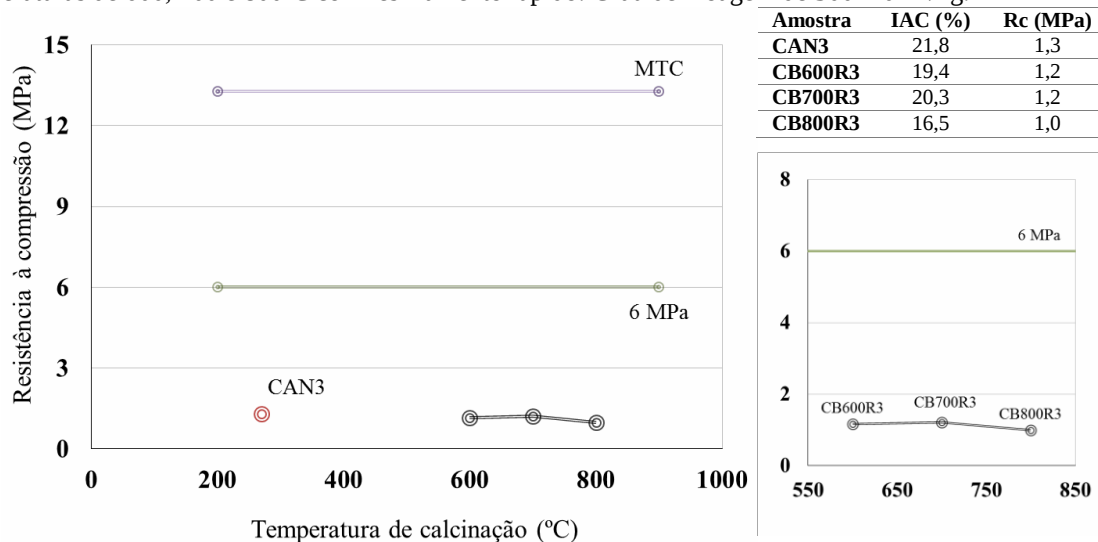
Na CBCA sem moagem a resistência mecânica dos corpos de prova foram de 0,2 MPa independente da temperatura de calcinação e a cinza sem calcinação apresentou uma resistência um pouco melhor de 0,3MPa. Já nas cinzas com grau de moagem de $300 \pm 20 \text{ m}^2/\text{kg}$ o IAC mais elevado foi nas cinzas calcinadas a 600°C e 700°C , que apresentaram resistência mecânica de 1,2 MPa, e o pior na cinza sem moagem, com resistência à compressão de 1,2 MPa. Por sua vez, as cinzas com grau de moagem de $400 \pm 20 \text{ m}^2/\text{kg}$ alcançaram maior resistência com a calcinação a 600°C , de 2,2MPa, e a pior na cinza sem tratamento térmico, com 1,7 MPa de resistência. Por fim, as cinzas com grau de moagem de $500 \pm 20 \text{ m}^2/\text{kg}$ obtiveram resistência à compressão muito próximas, independente do tratamento térmico, entre 2,5 e 2,8 MPa. Diante da diversidade de resultados, não se observa uma tendência de comportamento nas cinzas coma resfriamento lento.

Figura 4.71 – Resistência à compressão (ABNT NBR 5751:1992) da CBCA “in natura” e calcinada nas temperaturas de 600, 700 e 800°C com resfriamento rápido. Sem moagem.



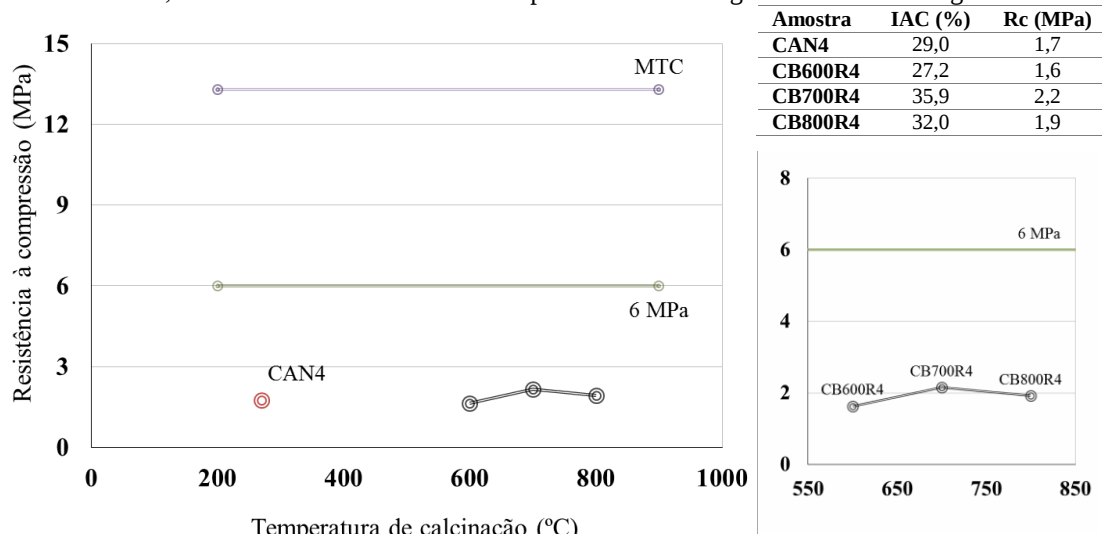
Fonte: Acervo Antônio Acácio de Melo Neto.

Figura 4.72 – Resistência à compressão (ABNT NBR 5751:1992) da CBCA “in natura” e calcinada nas temperaturas de 600, 700 e 800°C com resfriamento rápido. Grau de moagem de $300 \pm 20 \text{ m}^2/\text{kg}$.



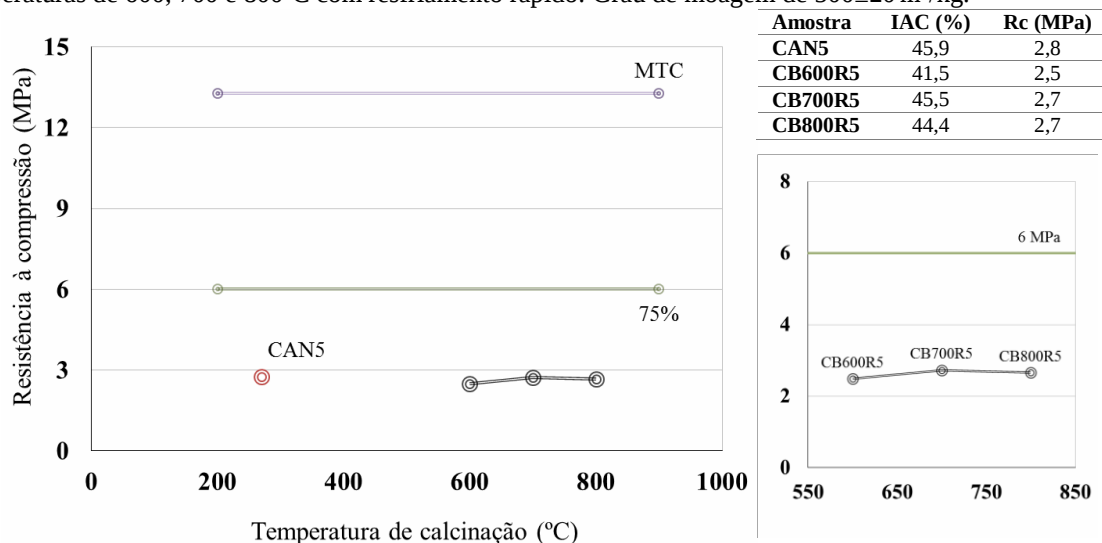
Fonte: Acervo Antônio Acácio de Melo Neto.

Figura 4.73 – Resistência à compressão (ABNT NBR 5751:1992) da CBCA “in natura” e calcinada nas temperaturas de 600, 700 e 800°C com resfriamento rápido. Grau de moagem de $400 \pm 20 \text{ m}^2/\text{kg}$.



Fonte: Acervo Antônio Acácio de Melo Neto.

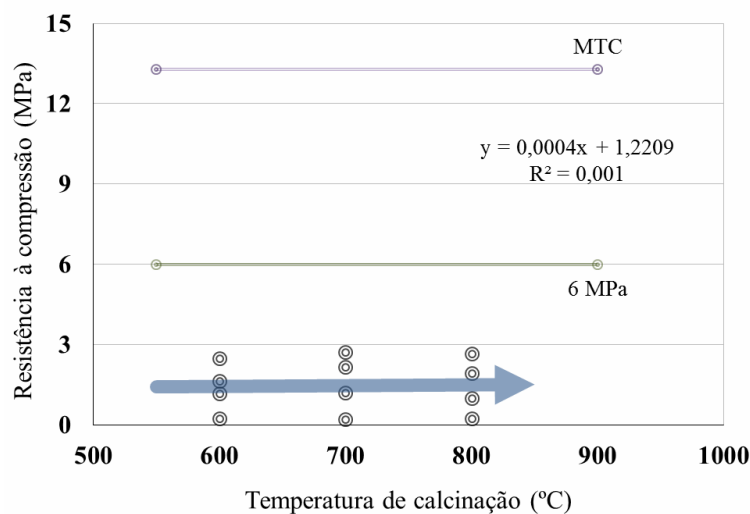
Figura 4.74 – Resistência à compressão (ABNT NBR 5751:1992) da CBCA “in natura” e calcinada nas temperaturas de 600, 700 e 800°C com resfriamento rápido. Grau de moagem de $500 \pm 20 \text{ m}^2/\text{kg}$.



Fonte: Acervo Antônio Acácio de Melo Neto.

Conforme já citado anteriormente, a aplicação do resfriamento rápido não apresentou os resultados esperados e, adicionalmente, as temperaturas de calcinação acima de 600°C se mostraram bastante ineficientes. Estas afirmações são ainda embasadas pela Figura 4.75 **Figura**, onde não se verifica nenhuma tendência de aumento da resistência à compressão com o aumento da temperatura de calcinação.

Figura 4.75 – Resistência à compressão (ABNT NBR 5751:1992) da CBCA versus a temperatura de calcinação. Todas as amostras. Calcinação seguida de resfriamento rápido.



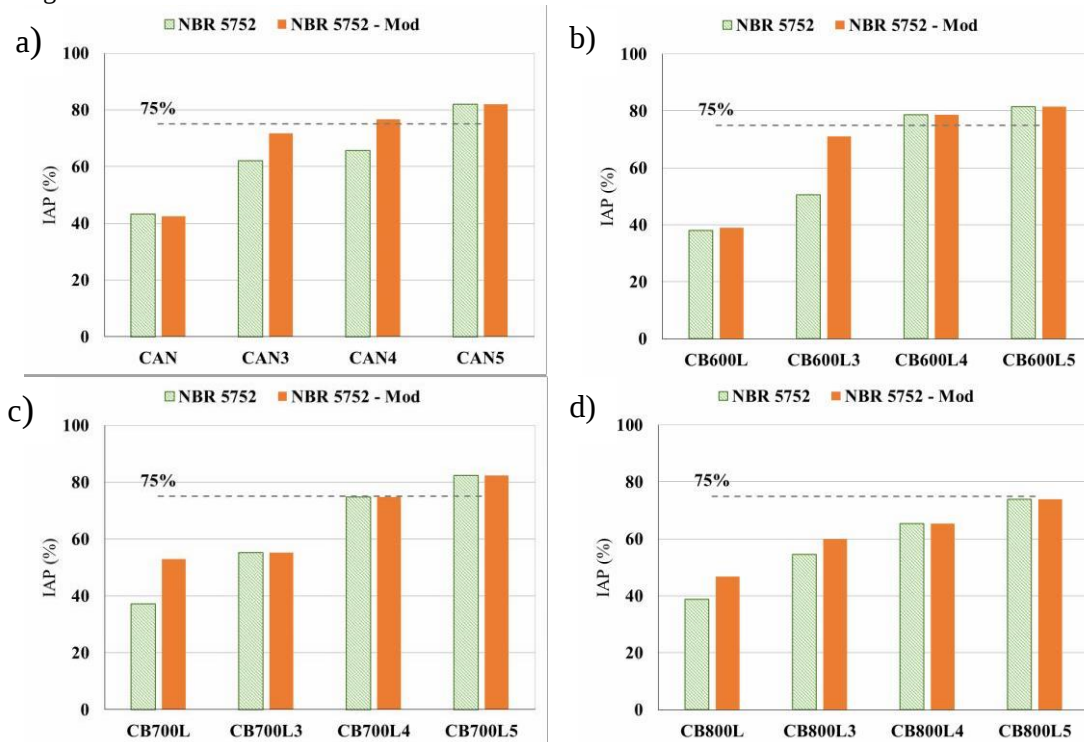
Fonte: Acervo Antônio Acácio de Melo Neto.

ABNT NBR 5752:1992 VERSUS ABNT NBR 5752:1992 MODIFICADA

De acordo com os resultados, observa-se que a modificação da NBR 5752:1992 proporcionou o aumento do IAP nas CBCA resfriadas lentamente (Figura 4.76), confirmando a crítica ao método original com relação à variação da relação água/aglomerante.

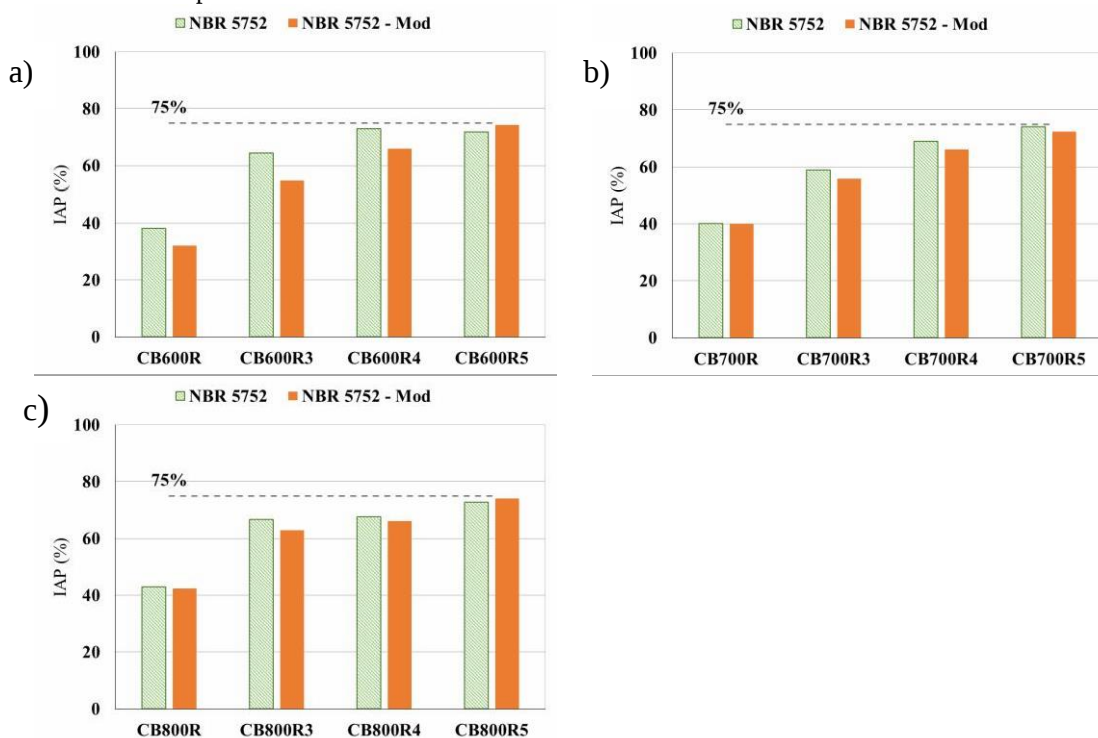
Este comportamento não se repetiu nas CBCA resfriadas rapidamente (Figura 4.77), onde não se observa um padrão. É possível que o efeito inesperado deste tratamento, que ao invés de aumentar a amorficidade do silício, em boa parte das amostras de cinza analisadas diminuiu sua reatividade, tenha prevalecido diante do efeito da modificação utilizada na NBR 5752:1992.

Figura 4.76 – Comparação entre o índice de atividade pozolânica (IAP) com cimento Portland da CBCA utilizando a ABNT NBR 5752:1992 e a ABNT NBR 5752:1992 modificada. CBCA “in natura” e calcinadas seguida de resfriamento lento.



Fonte: Acervo Antônio Acácio de Melo Neto.

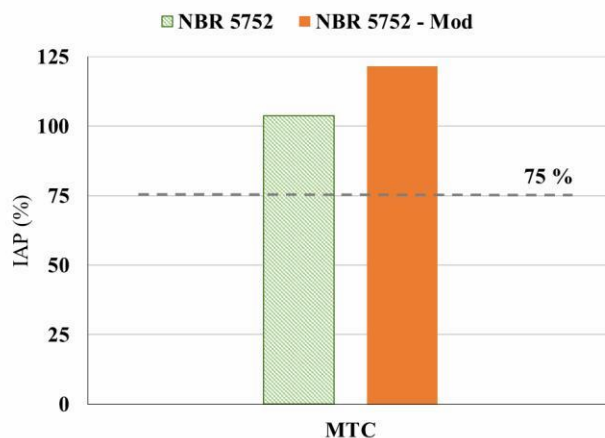
Figura 4.77 – Comparação entre o índice de atividade pozolânica (IAP) com cimento Portland da CBCA utilizando a ABNT NBR 5752:1992 e a ABNT NBR 5752:1992 modificada. CBCA calcinadas seguida de resfriamento rápido.



Fonte: Acervo Antônio Acácio de Melo Neto.

No metacaulim (Figura 4.78), o efeito da modificação da NBR 5752:1992 é nítido e provoca o aumento significativo, em torno de 17 %, quando da fixação da relação água/aglomerante utilizando aditivo\superplastificante.

Figura 4.78 – Comparação entre o índice de atividade pozolânica (IAP) com cimento Portland do Metacaulim utilizando a ABNT NBR 5752:1992 e a ABNT NBR 5752:1992 modificada.

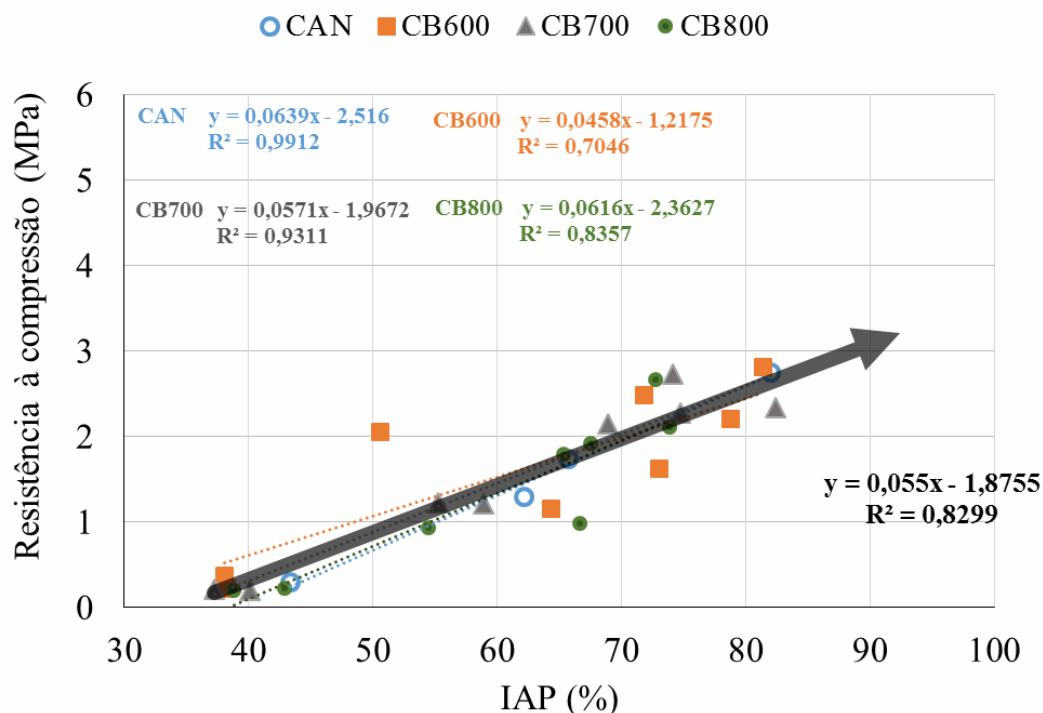


Fonte: Acervo Antônio Acácio de Melo Neto.

ABNT NBR 5752:1992 VERSUS ABNT NBR 5751:1992

De acordo com os resultados (Figura 4.79), observa-se que existe uma proporcionalidade entre o aumento do IAP (ABNT NBR 5752:1992) e do IAC (ABNT NBR 5751:1992), porém, enquanto na NBR 5752:1992 se atinge o limite mínimo determinado (75%), na NBR 5751:1992 o limite mínimo não é atingido (6 MPa ou IAC igual a 100%). É possível que, assumindo que o efeito fíler e a atividade pozolânica podem ocorrer simultaneamente, a NBR 5752:1992 seja mais sensível aos dois efeitos, enquanto a NBR 5751:1992 é mais sensível à atividade pozolânica. Este efeito é esperado, visto que a NBR 5751:1992 é a medida de resistência à compressão de argamassas de cal hidratada mais o material pozolânico, ou seja, o desenvolvimento da resistência é praticamente oriundo da formação do C - S - H da reação entre estes materiais.

Figura 4.79 – Resistência à compressão (ABNT NBR 5751:1992) versus o índice de atividade pozolânica (IAP) com cimento Portland (ABNT NBR 5752:1992) da CBCA. Todas as amostras.



Fonte: Acervo Antônio Acácio de Melo Neto.

Este comportamento observado é crítico na análise, pois pela NBR 5752:1992 o material atinge os requisitos para ser considerado pozolânico, mas não atinge o estabelecido pela NBR 5751:1992. Ressalta-se que parece óbvio que um material que atinja o requisito da NBR 5751:1992 (6 MPa), terá elevada probabilidade de atingir o IAP (75%) estabelecido pela NBR 5752:1992. Estas afirmações trazem outra questão, qual norma simularia o melhor uso do material como uma adição ao cimento Portland? Necessariamente, um material para ser adicionado a concretos ou argamassas deve ser pozolânico no nível estabelecido pela NBR 5751:1992?

Os resultados da NBR 5751:1992 evidenciam claramente que existe o consumo de hidróxido de cálcio associado ao desenvolvimento da resistência à compressão, o que caracteriza a atividade pozolânica. Uma crítica que se pode fazer ao método da NBR 5751:1992 é baseada na teoria da atividade pozolânica, que a mesma é uma reação de longo prazo, pois a norma determina a cura térmica ($55 \pm 2^\circ\text{C}$) selada por 7 dias. É possível que um material seja pozolânico a longo prazo e no ensaio acelerado da NBR 5751:1992 não alcance os requisitos para ser considerado pozolânico. Porém, a NBR 5751:1992 é bastante eficiente com materiais de elevado potencial pozolânico, conforme os resultados dos ensaios com metacaulim.

Taylor (1997) afirma que os métodos relacionados ao consumo de hidróxido de cálcio são limitados no seu uso em razão da pouca representatividade na resistência mecânica aos 28

dias, a qual depende mais da relação água/aglomerante do que a atividade pozolânica. O autor ainda sugere que os métodos químicos não substituem a observação das propriedades com aplicação do material com potencial pozolânico em argamassas e, preferencialmente, concretos. Gava e Prudêncio (2007a) também afirmam que ambos os métodos podem não ser eficazes em fornecer parâmetros sobre o desempenho de um material supostamente pozolânicos em concretos.

5. CONCLUSÕES

Os resultados das propriedades físicas e da microestrutura foram importantes para o entendimento da CBCA quanto ao seu potencial pozolânico. Os diferentes graus de moagem utilizados permitiram que a análise distinguisse de forma satisfatória os efeitos da diminuição do tamanho de partículas. Conclui-se que o efeito da moagem teve impacto positivo na melhoria da atividade pozolânica da CBCA do que o efeito da temperatura de calcinação e do tipo de resfriamento, dentro dos limites deste trabalho. Porém, realizando algumas extrapolações com base nos resultados obtidos com índice de atividade pozolânica com cal hidratada é possível estimar que o grau de moagem CBCA deve ser acima de 500 m²/kg (finura Blaine).

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

Na análise do efeito da temperatura de calcinação e do tipo de resfriamento, a DRX deixou evidente a explicação para os resultados insatisfatórios destes tratamentos no âmbito deste trabalho. Ambos os tratamentos provocaram o aumento da cristalinidade da CBCA, comportamento este associado ao aumento da intensidade (DRX) do pico principal do quartzo cristalino. De acordo com os resultados obtidos, este trabalho contribui para indicar que a temperatura de calcinação da CBCA deve limitar-se à 600°C e que a utilização do resfriamento rápido não é necessária quando o objetivo é aumentar a finura Blaine da CBCA acima de 400 m²/kg.

Os resultados obtidos com a determinação do índice de atividade pozolânica com cimento Portland (IAP) normatizado pela NBR 5752:1992 permitem concluir que a moagem acima da finura Blaine de 400 m²/kg da CBCA “in natura” e a CBCA calcinada à 600°C possibilitaram alcançar o limite mínimo do IAP (75%) para que o material seja considerado

pozolânico. Apesar de ser consensual a importância da moagem na adição de materiais em concreto e argamassas, os resultados deste trabalho indicam que a moagem da CBCA é fundamental para a sua aplicação como adição. Por conseguinte, no avanço do estudo do tema é importante a abordagem e estudo da moabilidade da CBCA, assim como a adoção de níveis de finura mais espaçados, como 500, 1000 e 1500 m²/kg. Apesar do aumento da finura por moagem envolver um custo, ressalta-se que a pozolana de referência, o metacaulim, passa por calcinação e moagem, alcançando uma finura Blaine em torno de 5 vezes maior do que o maior nível de moagem adotado neste trabalho.

O índice de atividade pozolânica com cal hidratada (IAC) das amostras de CBCA ficaram bem abaixo do valor de 6 MPa estabelecido pela NBR 5751:1992. Os melhores resultados foram obtidos com a CBCA “in natura” e a CBCA calcinada à 600°C, ambas com finura Blaine acima de 400 m²/kg, porém com valores abaixo de 50% do valor exigido na NBR 12653:1992. Estes resultados divergem dos resultados obtidos com o IAP estabelecido pela NBR 5752:1992. Portanto, estabelece uma contradição no entendimento da atividade pozolânica da CBCA, ressaltando-se que a NBR 12653:1992 é correta ao estabelecer uma série de requisitos para que o material seja considerado pozolânico. Porém, o conceito de pozolanicidade é atingido, pois pelos resultados da NBR 5751:1992 é evidente que a resistência à compressão é oriunda na existência da reação entre a CBCA e a cal hidratada.

Diante dos resultados obtidos é possível concluir que a CBCA tem uma reatividade reduzida se comparada ao metacaulim, mesmo assim, os ensaios da NBR 5752:1992 demonstraram que dependendo do tipo de tratamento que a CBCA recebe ela pode ser utilizada como adição pozolânica. Contudo, para que a CBCA possa ser comercializada como adição para cimento Portland é necessário que as usinas tenham um maior controle da temperatura de queima do bagaço dentro das caldeiras, para que a cinza seja reativa, como também é necessário reduzir sua granulometria através de moagem. O beneficiamento da CBCA para comercialização além das vantagens econômicas trará uma enorme ganho do ponto de vista ambiental.

É importante ressaltar que os dados apresentados neste trabalho referem-se apenas as amostras coletadas que passaram, ou não, por diferentes tratamentos térmicos e físicos. Para se chegar a dados mais conclusivos, é necessário o aprofundamento deste estudo com ensaios químicos e termogravimétricos. Através destes novos ensaios será possível averiguar o percentual de sílica reativa e CO₂ presente na CBCA analisada apenas por ensaios físicos.

A calcinação do bagaço de cana em fornos rotativos com controle de temperatura para produção de cinza também poderia ser objeto de estudo de trabalhos futuros, visto que, este tipo de forno levaria a produção de uma cinza mais homogênea e reativa. Atualmente, as

cinzas produzidas nas caldeiras das usinas são um material bastante heterogêneo com muitas impurezas e que sempre precisam passar por um processo de peneiramento antes de qualquer ensaio de pozolanicidade para remover grãos maiores e material orgânico que não chegou a ser calcinado.

Também caberia em futuros trabalhos refazer os ensaios mecânicos de compressão, porém, utilizando corpos de prova em idades mais avançadas. Conforme as normas NBR 5751:1992 e NBR 5752:1992 os corpos de prova devem ser rompidos respectivamente com 7 e 28 dias, porém a reação pozolânica ocorre lentamente e não pode ser completamente verificada aos 28 dias, muito menos aos 7 dias. Cyr et.al. (2006) defende que os efeitos físicos e químicos das reações pozolânicas podem ocorrer em até 180 dias, por esta razão caberia a realização de novos ensaios com corpos de prova em idades mais avançadas bem como se rever as normas para análise pozolânica.

Como foi demonstrada nesse trabalho, dependendo da idade dos corpos de prova analisados, pode-se ter uma incongruência de resultados quanto à pozolanicidade de uma adição. No presente trabalho, os corpos de prova rompidos com 7 dias seguindo os procedimentos da norma NBR 5751:1992 não apresentaram os valores mínimos de IAC determinados por esta norma para que a CBCA fosse considerada um material pozolânico. Já os corpos de prova rompidos com 28 dias segundo os procedimentos da NBR 5752:1992, em alguns casos, atenderam os pré-requisitos para serem classificados com adição pozolânica.

PROPOSTAS PARA TRABALHOS FUTUROS

- Estudos exploratórios utilizando técnicas de microestrutura, como difração de raios X, podem reduzir expressivamente o número de variações para a verificação com métodos físicos de verificação da atividade pozolânica;
- A moabilidade da cinza do bagaço de cana-de-açúcar (CBCA) deve ser objeto de uma abordagem mais profunda, pois, a moagem mostrou ser um fator preponderante na atividade pozolânica da CBCA;
- Análise das atividades pozolânicas da CBCA em pastas de cimento com idades superiores a 180 dias;
- Determinação do consumo de hidróxido de cálcio pelas reações pozolânicas por meio de análise termogravimétrica e identificação do C-S-H como produto de hidratação utilizando microscópio eletrônico de varredura;

REFERÊNCIAS

- 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 pozzolânicos – Especificação. Rio de Janeiro, 1992.
- _____. **NBR 15895**: Materiais pozzolânicos – Determinação do teor de hidróxido de cálcio fixado - Método Chapelle modificado. Rio de Janeiro, 2010.
- _____. **NBR NM 23**: Cimento Portland e outros materiais em pó - Determinação de massa específica. Rio de Janeiro, 2001.
- _____. **NBR NM 248**: Agregados - Determinação da composição granulométrica. Rio de Janeiro, 2003.
- _____. **NBR NM 52**: Agregado miúdo - Determinação da massa específica e massa específica aparente. Rio de Janeiro, 2009.
- _____. **NBR 5751**: Materiais pozzolânicos - Determinação de atividade pozzolânica - Índice de atividade pozzolânica com cal. Rio de Janeiro, 1992.
- _____. **NBR 5752**: Materiais pozzolânicos - Determinação de atividade pozzolânica com cimento Portland - Índice de atividade pozzolânica com cimento. Rio de Janeiro, 1992.
- _____. **NBR 5753**: Cimento Portland pozzolânico - Determinação da pozzolanidade. Rio de Janeiro, 1992.
- _____. **NBR 7215**: Cimento Portland - Determinação da resistência à compressão. Rio de Janeiro, 1996.
- _____. **NBR NM 76**: Cimento Portland - Determinação da finura pelo método de permeabilidade ao ar (Método de Blaine). Rio de Janeiro, 1998.
- _____. **NBR 9202**: Cimento Portland e outros materiais em pó - Determinação da finura por meio da peneira 0,044 mm (nº 325) - Método de ensaio. Rio de Janeiro, 1985.
- ANJOS, M. A. S; MARTINELLI, A. E. Caracterização do resíduo da biomassa da cana-de-açúcar para aplicação em pastas cimentícias. 2008. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA E CIÊNCIA DOS MATERIAIS, 18., 2008, Porto de Galinhas. **Anais...** Porto de Galinhas: CBECiMat. Disponível em: http://www.cbecimat.com.br/Trab_Completos/113-050.doc. Acesso em: 03 mar. 2013.
- AUBERT, J.E.; SEGUI, P.; HUSSON, B.; MEASSON, M. A method developed to quantify lime and gypsum consumed by mineral additions. **Cement and Concrete Composites**, v.34, n.7, p.874-880, 2012.
- BASHA EA, HASHIM R, MAHMUD HB, MUNTOHAR AS. Stabilization of residual soil with rice husk ash and cement. **Const Building Materials**, n.19, p.448-53, 2005

BENEZET, J.C.; BENHASSAINE, A. Grinding and pozzolanic reactivity of quartz powders. **Powder Technology**, v.105, n.1-3, p.167–171, 1999.

BESSA, S. A. L. **Utilização do bagaço de cana-de-açúcar como agregado miúdo em concretos para artefatos de infraestrutura urbana**. Tese (Doutorado) – Universidade Federal de São Carlos: São Carlos, 2011.

CALDAS, A., MELO NETO, A. A., PIRES SOBRINHO, C. W. A., JOHN, V. M. O uso de cinzas residuais para produção de novos materiais e componentes construtivos. In: CONGRESSO INTERNACIONAL DE TECNOLOGIA E GESTÃO DA QUALIDADE NA CONSTRUÇÃO CIVIL, 2. Recife, 2000. **Anais...** Recife, 2000.

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

CORDEIRO, G.C.; TOLEDO FILHO, R.D.; FAIRBAIRN, E.M.R. Caracterização de cinza do bagaço de cana-de-açúcar para emprego como pozolana em materiais cimentícios. **Química Nova**, v. 32, n. 1, p. 82-86, 2009.

CORDEIRO, L.N.P. **Análise da variação do índice de amorfismo da cinza de casca de arroz sobre a atividade pozolânica**. Tese (Doutorado) – UFRS: Porto Alegre, 2009.

CYR, M.; LAWRENCE, P.; RINGOT E. Efficiency of mineral admixtures in mortars: Quantification of the physical and chemical effects of fine admixtures in relation with compressive strength. **Cement and Concrete Research**. n.36, p. 264-277, 2006.

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

ESTEVEZ, L.P. On the hydration of water-entrained cement–silica systems: Combined SEM, XRD and thermal analysis in cement pastes. **Thermochimica Acta**, v.518, n.1, p.27-35, 2011.

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

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

GALLO, G.; SANCHEZ, L.; MEDEIROS, M.H.F.; ANDRADE, T. Medidas preventivas para a reação álcali-agregado (RAA) no concreto. **Concreto**, São Paulo, v. 46, p. 22-28, 2007.

GALVAO, S. P. **Avaliação do desempenho de argamassas de reparo estrutural à base de cimento Portland modificadas por polímeros e contendo adições minerais**. Goiânia: UFG, 2004.

GASTALDINI, A. L. G.; ISAIA, G. C & ZANELLA, R. Composição da solução aquosa de pastas com adições minerais. In: **CONGRESSO BRASILEIRO DO CONCRETO**, 41. 1999, Salvador. CD ROM.Salvador: IBRACON, 1999. 16p.

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

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

GAVA, G.P.; PRUDENCIO, L.R. Pozzolanic activity tests as a measure of pozzolans' performance.Part2. **Magazine Of Concrete Research**, v.59, n.10, p.735–741, 2007b.

GOBBI, A.; GROENWOLD, J.A.; MEDEIROS, M.H.F. Cinza de bagaço de cana-de-açúcar: Contribuição para a sustentabilidade dos materiais de reparo. In: VI CONGRESSO INTERNACIONAL SOBRE PATOLOGIA E REABILITAÇÃO DE ESTRUTURAS, 6., Córdoba: , 2010. **Anais...** Córdoba, 2010.

GROENWOLD, J. A.; GOBBI, A.; MEDEIROS, M. H. F.. Investigação sobre a atividade pozolânica da cinza de bagaço de cana-de-açúcar. In: EVINCI.17., Curitiba: UFPR, 2009. **Resumos...** Curitiba, 2009. p. 224-224.

HELENE, P.; MEDEIROS, M.H.F. **Estudo da influência do metacaulim HP como adição de alta eficiência em concretos de cimento Portland**. São Paulo, 66 p., 2004.

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

HOPPE FILHO, J. **Sistemas cimento, cinza volante e cal hidratada: mecanismo de hidratação, microestrutura e carbonatação de concreto**. Tese (Doutorado) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2008.

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

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

LIMA, C. C. **Caracterização química de resíduos da produção de biodiesel compostados com adição mineral**. TeseDoutorado. Universidade Federal de Viçosa, UFV, Minas Gerais, 2006.

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

MASSAZZA, F. Pozzolana and Pozzolanic Cements. In: Hewlett, P.C. (ed.), **Lea's Chemistry of Cement and Concrete**, 4. ed. London: Arnold PublishersLondosn, p. 485-500, 1998.

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

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

MONTGOMERY, D.C. **Design and analysis of experiments**. 4. ed., John Wiley, 1997.

MOROPOULOU, A.; BAKOLAS, A.; AGGELAKOPOULOU, E. Evaluation of pozzolanic activity of natural and artificial pozzolans by thermal analysis. **Thermochimica Acta**, v.420, n.1, p.135-140, 2004.

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

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

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

PONTES, J.M.P.N. **Reatividade de Pozolanas para Argamassas e Betões**. Dissertação (Mestrado) – Universidade Nova de Lisboa, 2011.

POUEY, M.T.F. **Beneficiamentos da cinza da casca de arroz residual com vistas à produção de cimento composto e/ou pozolânico**. Tese (Doutorado) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2006.

ROMERO T., Bagaço na construção civil. Agência de Notícias da Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo. Disponível em: <<http://www.agencia.fapesp.br/materia/7211/noticias/bagaco-na-construcao-civil.htm>>. Acesso em: 30 abr. 2009.

SOUZA, G. N; FORMAGINI, S.; CUSTÓDIO, F. O.; SILVEIRA, M. M. Desenvolvimento de Argamassas com Substituição Parcial do Cimento Portland por Cinzas Residuais do Bagaço de Cana-de-açúcar. 2007. In: Congresso Brasileiro do Concreto, 49., Bento Gonçalves – IBRACON. **Anais...** Bento Gonçalves: IBRACON. CD-ROM.

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

TEIXEIRA, R.S. **Utilização de resíduos sucro-alcooleiros na fabricação de fibrocimento pelo processo de extrusão**. Dissertação (Mestrado em Engenharia). Universidade de São Paulo, São Carlos, 131 p, 2010.

ÚNICA - União da Agroindústria Canavieira do Estado de São Paulo (2012) Disponível em: <<http://www.unica.com.br>>. Acesso em: 12 jun. 2012.

VALDUGA, L. **Influência das condições de ensaio da ASTM C1260 na verificação da reação álcali-agregado**. Tese (Doutorado) – UFRS: Porto Alegre, 2008.

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

WANSOM, S.; JANJATURAPHAN, S.; SINTHUPINYO, S. Characterizing pozzolanic activity of rice husk ash by impedance spectroscopy. **Cement and Concrete Research**, v.40, n.12, p.1714-1722, 2010.

WEBER, S.L. **Metodologia para obtenção de sílica de elevada reatividade para uso em concreto de alto desempenho a partir do processamento de cinza de casca de arroz**. UFSC: Florianópolis, 2001. 98p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil). Curso de Pós-Graduação em Engenharia Civil,

ZARDO, A. M.; BEZERRA, E. M.; MARTELLO, L. S.; SAVASTANO Jr., H. Utilização da cinza de bagaço cana-de-açúcar como “filler” em compostos de fibrocimento. In: CONFERÊNCIA LATINO-AMERICANA DE CONSTRUÇÃO SUSTENTÁVEL, 1.,/ ENCONTRO NACIONAL DE TECNOLOGIA DO AMBIENTE CONSTRUÍDO, 10., 2004, São Paulo. **Anais...** São Paulo: Entac, 2004. CD-ROM.

APÊNDICE

Resultados brutos – NBR 5751, NBR 5752 e NBR 5752 Modificada

NBR 5751 – CBCA resfriada lentamente

CAN

CBCA “in natura” – CAN – sem moagem

Corpos-de-prova	CAN 1	CAN 2	CAN 3	CAN 4	CAN5	CAN6
Carga (toneladas)	0,06	0,06	0,06	0,06	0,06	0,06
Resistência à compressão (MPa)	0,30	0,30	0,30	0,30	0,30	0,30
<i>Média (MPa)</i>						0,30
<i>Desvio padrão (MPa)</i>						0,00
<i>Coefficiente de variação (%)</i>						0,00

CBCA “in natura” – CAN3 – finura Blaine 300 m²/kg

Corpos-de-prova	CAN3 1	CAN3 2	CAN3 3	CAN3 4	CAN35	CAN36
Carga (toneladas)	0,26	0,26	0,25	0,28	0,26	0,26
Resistência à compressão (MPa)	1,30	1,30	1,25	1,40	1,30	1,30
<i>Média (MPa)</i>						1,31
<i>Desvio padrão (MPa)</i>						0,05
<i>Coefficiente de variação (%)</i>						3,76

CBCA “in natura” – CAN4 – finura Blaine 400 m²/kg

Corpos-de-prova	CAN4 1	CAN4 2	CAN4 3	CAN4 4	CAN4 5	CAN4 6
Carga (toneladas)	0,32	0,32	0,34	0,39	0,38	0,34
Resistência à compressão (MPa)	1,60	1,60	1,70	1,95	1,90	1,70
<i>Média (MPa)</i>						1,74
<i>Desvio padrão (MPa)</i>						0,15
<i>Coefficiente de variação (%)</i>						8,60

CBCA “in natura” – CAN5 – finura Blaine 500 m²/kg

Corpos-de-prova	CAN5 1	CAN5 2	CAN5 3	CAN5 4	CAN5 5	CAN5 6
Carga (toneladas)	0,55	0,53	0,54	0,55	0,59	0,55
Resistência à compressão (MPa)	2,75	2,65	2,70	2,75	2,95	2,75
<i>Média (MPa)</i>						2,76
<i>Desvio padrão (MPa)</i>						0,10
<i>Coefficiente de variação (%)</i>						3,70

CB600L**CBCA calcinada a 600°C – CB600L – sem moagem e resfriada lentamente**

Corpos-de-prova	CB600L 1	CB600L 2	CB600L 3	CB600L 4	CB600L 5	CB600L 6
Carga (toneladas)	0,08	0,08	0,07	0,08	0,08	0,07
Resist. à comp. (MPa)	0,40	0,40	0,35	0,40	0,40	0,35

<i>Média (MPa)</i>	0,38
<i>Desvio padrão (MPa)</i>	0,03
<i>Coeficiente de variação (%)</i>	6,74

CBCA calcinada a 600°C – CB600L3 – finura Blaine 300 m²/kg e resfriada lentamente

Corpos-de-prova	CB600L3 1	CB600L3 2	CB600L3 3	CB600L3 4	CB600L3 5	CB600L3 6
Carga (toneladas)	0,39	0,43	0,39	0,44	0,39	0,43
Resist. à comp. (MPa)	1,95	2,15	1,95	2,20	1,95	2,15

<i>Média (MPa)</i>	2,06
<i>Desvio padrão (MPa)</i>	0,12
<i>Coeficiente de variação (%)</i>	5,83

CBCA calcinada a 600°C – CB600L4 – finura Blaine 400 m²/kg e resfriada lentamente

Corpos-de-prova	CB600L4 1	CB600L4 2	CB600L4 3	CB600L4 4	CB600L4 5	CB600L4 6
Carga (toneladas)	0,44	0,44	0,46	0,47	0,41	0,44
Resist. à comp. (MPa)	2,20	2,20	2,30	2,35	2,05	2,20

<i>Média (MPa)</i>	2,21
<i>Desvio padrão (MPa)</i>	0,10
<i>Coeficiente de variação (%)</i>	4,66

CBCA calcinada a 600°C – CB600L5 – finura Blaine 500 m²/kg e resfriada lentamente

Corpos-de-prova	CB600L5 1	CB600L5 2	CB600L5 3	CB600L5 4	CB600L5 5	CB600L5 6
Carga (toneladas)	0,59	0,57	0,56	0,60	0,52	0,55
Resist. à comp. (MPa)	2,95	2,85	2,80	3,00	2,60	2,75

<i>Média (MPa)</i>	2,82
<i>Desvio padrão (MPa)</i>	0,14
<i>Coeficiente de variação (%)</i>	5,10

CB700L**CBCA calcinada a 700°C – CB700L – sem moagem e resfriada lentamente**

Corpos-de-prova	CB700L 1	CB700L 2	CB700L 3	CB700L 4	CB700L 5	CB700L 6
Carga (toneladas)	0,04	0,05	0,03	0,04	0,05	0,05
Resist. à comp. (MPa)	0,20	0,25	0,15	0,20	0,25	0,25

<i>Média (MPa)</i>	0,22
<i>Desvio padrão (MPa)</i>	0,04
<i>Coeficiente de variação (%)</i>	18,84

CBCA calcinada a 700°C – CB700L3 – finura Blaine 300 m²/kg e resfriada lentamente

Corpos-de-prova	CB700L3 1	CB700L3 2	CB700L3 3	CB700L3 4	CB700L3 5	CB700L3 6
Carga (toneladas)	0,24	0,22	0,26	0,25	0,24	0,26
Resist. à comp. (MPa)	1,20	1,10	1,30	1,25	1,20	1,30

<i>Média (MPa)</i>	1,22
<i>Desvio padrão (MPa)</i>	0,08
<i>Coeficiente de variação (%)</i>	6,19

CBCA calcinada a 700°C – CB700L4 – finura Blaine 400 m²/kg e resfriada lentamente

Corpos-de-prova	CB700L4 1	CB700L4 2	CB700L4 3	CB700L4 4	CB700L4 5	CB700L4 6
Carga (toneladas)	0,42	0,47	0,45	0,49	0,42	0,49
Resist. à comp. (MPa)	2,10	2,35	2,25	2,45	2,10	2,45

<i>Média (MPa)</i>	2,28
<i>Desvio padrão (MPa)</i>	0,16
<i>Coeficiente de variação (%)</i>	7,02

CBCA calcinada a 700°C – CB700L5 – finura Blaine 500 m²/kg e resfriada lentamente

Corpos-de-prova	CB700L5 1	CB700L5 2	CB700L5 3	CB700L5 4	CB700L5 5	CB700L5 6
Carga (toneladas)	0,49	0,49	0,45	0,47	0,45	0,46
Resist. à comp. (MPa)	2,45	2,45	2,25	2,35	2,25	2,30

<i>Média (MPa)</i>	2,34
<i>Desvio padrão (MPa)</i>	0,09
<i>Coeficiente de variação (%)</i>	3,92

CB800L**CBCA calcinada a 800°C – CB800L – sem moagem e resfriada lentamente**

Corpos-de-prova	CB800L 1	CB800L 2	CB800L 3	CB800L 4	CB800L 5	CB800L 6
Carga (toneladas)	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04
Resist. à comp. (MPa)	0,20	0,20	0,20	0,20	0,20	0,20
<i>Média (MPa)</i>						0,20
<i>Desvio padrão (MPa)</i>						0,00
<i>Coefficiente de variação (%)</i>						0,00

CBCA calcinada a 800°C – CB800L3 – finura Blaine 300 m²/kg e resfriada lentamente

Corpos-de-prova	CB800L3 1	CB800L3 2	CB800L3 3	CB800L3 4	CB800L3 5	CB800L3 6
Carga (toneladas)	0,19	0,18	0,19	0,18	0,19	0,19
Resist. à comp. (MPa)	0,95	0,90	0,95	0,90	0,95	0,95
<i>Média (MPa)</i>						0,93
<i>Desvio padrão (MPa)</i>						0,03
<i>Coefficiente de variação (%)</i>						2,77

CBCA calcinada a 800°C – CB800L4 – finura Blaine 400 m²/kg e resfriada lentamente

Corpos-de-prova	CB800L4 1	CB800L4 2	CB800L4 3	CB800L4 4	CB800L4 5	CB800L4 6
Carga (toneladas)	0,34	0,36	0,36	0,40	0,33	0,36
Resist. à comp. (MPa)	1,70	1,80	1,80	2,00	1,65	1,80
<i>Média (MPa)</i>						1,79
<i>Desvio padrão (MPa)</i>						0,12
<i>Coefficiente de variação (%)</i>						6,70

CBCA calcinada a 800°C – CB800L5 – finura Blaine 500 m²/kg e resfriada lentamente

Corpos-de-prova	CB800L5 1	CB800L5 2	CB800L5 3	CB800L5 4	CB800L5 5	CB800L5 6
Carga (toneladas)	0,43	0,43	0,44	0,41	0,43	0,39
Resist. à comp. (MPa)	2,15	2,15	2,20	2,05	2,15	1,95
<i>Média (MPa)</i>						2,11
<i>Desvio padrão (MPa)</i>						0,09
<i>Coefficiente de variação (%)</i>						3,92

NBR 5751 – CBCA resfriada rapidamente

CB600R

CBCA calcinada a 600°C – CB600R – sem moagem e resfriada rapidamente

Corpos-de-prova	CB600R 1	CB600R 2	CB600R 3	CB600R 4	CB600R 5	CB600R 6
Carga (toneladas)	0,05	0,04	0,05	0,05	0,04	0,05
Resist. à comp. (MPa)	0,25	0,20	0,25	0,25	0,20	0,25

<i>Média (MPa)</i>	0,23
<i>Desvio padrão (MPa)</i>	0,03
<i>Coeficiente de variação (%)</i>	11,07

CBCA calcinada a 600°C – CB600R3 – finura Blaine 300 m²/kg e resfriada rapidamente

Corpos-de-prova	CB600R3 1	CB600R3 2	CB600R3 3	CB600R3 4	CB600R3 5	CB600R3 6
Carga (toneladas)	0,22	0,23	0,25	0,24	0,22	0,24
Resist. à comp. (MPa)	1,10	1,15	1,25	1,20	1,10	1,20

<i>Média (MPa)</i>	1,17
<i>Desvio padrão (MPa)</i>	0,06
<i>Coeficiente de variação (%)</i>	5,19

CBCA calcinada a 600°C – CB600R4 – finura Blaine 400 m²/kg e resfriada rapidamente

Corpos-de-prova	CB600R4 1	CB600R4 2	CB600R4 3	CB600R4 4	CB600R4 5	CB600R4 6
Carga (toneladas)	0,31	0,33	0,35	0,32	0,31	0,34
Resist. à comp. (MPa)	1,55	1,65	1,75	1,60	1,55	1,70

<i>Média (MPa)</i>	1,63
<i>Desvio padrão (MPa)</i>	0,08
<i>Coeficiente de variação (%)</i>	5,00

CBCA calcinada a 600°C – CB600R5 – finura Blaine 500 m²/kg e resfriada rapidamente

Corpos-de-prova	CB600R5 1	CB600R5 2	CB600R5 3	CB600R5 4	CB600R5 5	CB600R5 6
Carga (toneladas)	0,51	0,47	0,53	0,49	0,46	0,53
Resist. à comp. (MPa)	2,55	2,35	2,65	2,45	2,30	2,65

<i>Média (MPa)</i>	2,49
<i>Desvio padrão (MPa)</i>	0,15
<i>Coeficiente de variação (%)</i>	6,01

CB700R**CBCA calcinada a 700°C – CB700R – sem moagem e resfriada rapidamente**

Corpos-de-prova	CB700R 1	CB700R 2	CB700R 3	CB700R 4	CB700R 5	CB700R 6
Carga (toneladas)	0,04	0,04	0,03	0,04	0,04	0,05
Resist. à comp. (MPa)	0,20	0,20	0,15	0,20	0,20	0,25

<i>Média (MPa)</i>	0,20
<i>Desvio padrão (MPa)</i>	0,03
<i>Coefficiente de variação (%)</i>	15,81

CBCA calcinada a 700°C – CB700R3 – finura Blaine 300 m²/kg e resfriada rapidamente

Corpos-de-prova	CB700R3 1	CB700R3 2	CB700R3 3	CB700R3 4	CB700R3 5	CB700R3 6
Carga (toneladas)	0,26	0,23	0,24	0,25	0,25	0,23
Resist. à comp. (MPa)	1,30	1,15	1,20	1,25	1,25	1,15

<i>Média (MPa)</i>	1,22
<i>Desvio padrão (MPa)</i>	0,06
<i>Coefficiente de variação (%)</i>	4,98

CBCA calcinada a 700°C – CB700R4 – finura Blaine 400 m²/kg e resfriada rapidamente

Corpos-de-prova	CB700R4 1	CB700R4 2	CB700R4 3	CB700R4 4	CB700R4 5	CB700R4 6
Carga (toneladas)	0,44	0,45	0,42	0,39	0,42	0,47
Resist. à comp. (MPa)	2,20	2,25	2,10	1,95	2,10	2,35

<i>Média (MPa)</i>	2,16
<i>Desvio padrão (MPa)</i>	0,14
<i>Coefficiente de variação (%)</i>	6,46

CBCA calcinada a 700°C – CB700R5 – finura Blaine 500 m²/kg e resfriada rapidamente

Corpos-de-prova	CB700R5 1	CB700R5 2	CB700R5 3	CB700R5 4	CB700R5 5	CB700R5 6
Carga (toneladas)	0,54	0,52	0,55	0,52	0,57	0,58
Resist. à comp. (MPa)	2,70	2,60	2,75	2,60	2,85	2,90

<i>Média (MPa)</i>	2,73
<i>Desvio padrão (MPa)</i>	0,13
<i>Coefficiente de variação (%)</i>	4,58

CB800R**CBCA calcinada a 800°C – CB800R – sem moagem e resfriada rapidamente**

Corpos-de-prova	CB800R 1	CB800R 2	CB800R 3	CB800R 4	CB800R 5	CB800R 6
Carga (toneladas)	0,04	0,04	0,05	0,05	0,05	0,04
Resist. à comp. (MPa)	0,20	0,20	0,25	0,25	0,25	0,20

<i>Média (MPa)</i>	0,22
<i>Desvio padrão (MPa)</i>	0,03
<i>Coeficiente de variação (%)</i>	12,17

CBCA calcinada a 800°C – CB800R3 – finura Blaine 300 m²/kg e resfriada rapidamente

Corpos-de-prova	CB800R3 1	CB800R3 2	CB800R3 3	CB800R3 4	CB800R3 5	CB800R3 6
Carga (toneladas)	0,19	0,18	0,20	0,23	0,17	0,22
Resist. à comp. (MPa)	0,95	0,90	1,00	1,15	0,85	1,10

<i>Média (MPa)</i>	0,99
<i>Desvio padrão (MPa)</i>	0,12
<i>Coeficiente de variação (%)</i>	11,68

CBCA calcinada a 800°C – CB800R4 – finura Blaine 400 m²/kg e resfriada rapidamente

Corpos-de-prova	CB800R4 1	CB800R4 2	CB800R4 3	CB800R4 4	CB800R4 5	CB800R4 6
Carga (toneladas)	0,38	0,40	0,35	0,42	0,37	0,39
Resist. à comp. (MPa)	1,90	2,00	1,75	2,10	1,85	1,95

<i>Média (MPa)</i>	1,92
<i>Desvio padrão (MPa)</i>	0,12
<i>Coeficiente de variação (%)</i>	6,31

CBCA calcinada a 800°C – CB800R5 – finura Blaine 500 m²/kg e resfriada rapidamente

Corpos-de-prova	CB800R5 1	CB800R5 2	CB800R5 3	CB800R5 4	CB800R5 5	CB800R5 6
Carga (toneladas)	0,55	0,50	0,56	0,56	0,50	0,53
Resist. à comp. (MPa)	2,75	2,50	2,80	2,80	2,50	2,65

<i>Média (MPa)</i>	2,66
<i>Desvio padrão (MPa)</i>	0,14
<i>Coeficiente de variação (%)</i>	5,26

NBR 5751 – Metacaulim**MTC - Metacaulim**

Corpos-de-prova	MTC 1	MTC 2	MTC 3	MTC 4	MTC 5	MTC 6
Carga (toneladas)	2,51	2,78	2,62	2,64	2,79	2,61
Resist. à comp. (MPa)	12,54	13,88	13,09	13,19	13,93	13,04
						<i>Média (MPa)</i> 13,28
						<i>Desvio padrão (MPa)</i> 0,54
						<i>Coefficiente de variação (%)</i> 4,06

NBR 5752 – Cimento Portland CPV ARI**CPV ARI – Cimento Portland de alta resistência inicial**

Corpos-de-prova	CPV ARI1	CPV ARI 2	CPV ARI 3	CPV ARI 4	CPV ARI 5	CPV ARI 6
Carga (toneladas)	7,64	8,00	7,86	7,72	7,11	7,22
Resist. à comp. (MPa)	38,16	39,96	39,26	38,56	35,51	36,06
						<i>Média (MPa)</i> 37,92
						<i>Desvio padrão (MPa)</i> 1,77
						<i>Coefficiente de variação (%)</i> 4,67

NBR 5752 – CBCA resfriada lentamente**CAN****CBCA “in natura” – CAN – sem moagem**

Corpos-de-prova	CAN 1	CAN 2	CAN 3	CAN 4	CAN 5	CAN 6
Carga (toneladas)	3,64	3,64	3,16	3,06	3,11	3,13
Resistência à compressão (MPa)	18,19	18,19	15,78	15,26	15,52	15,65
						<i>Média (MPa)</i> 16,43
						<i>Desvio padrão (MPa)</i> 1,37
						<i>Coefficiente de variação (%)</i> 8,36

CBCA “in natura” – CAN3 – finura Blaine 300 m²/kg

Corpos-de-prova	CAN3 1	CAN3 2	CAN3 3	CAN3 4	CAN3 5	CAN3 6
Carga (toneladas)	5,18	4,63	4,48	4,28	4,80	4,91
Resistência à compressão (MPa)	25,89	23,12	22,38	21,38	23,95	24,53
						<i>Média (MPa)</i> 23,54
						<i>Desvio padrão (MPa)</i> 1,60
						<i>Coefficiente de variação (%)</i> 6,81

CBCA “in natura” – CAN4 – finura Blaine 400 m²/kg

Corpos-de-prova	CAN4 1	CAN4 2	CAN4 3	CAN4 4	CAN4 5	CAN4 6
Carga (toneladas)	5,32	4,85	4,89	4,93	4,58	5,35
Resistência à compressão (MPa)	26,56	24,21	24,44	24,60	22,89	26,72
<i>Média (MPa)</i>						24,90
<i>Desvio padrão (MPa)</i>						1,48
<i>Coefficiente de variação (%)</i>						5,93

CBCA “in natura” – CAN5 – finura Blaine 500 m²/kg

Corpos-de-prova	CAN5 1	CAN5 2	CAN5 3	CAN5 4	CAN5 5	CAN5 6
Carga (toneladas)	6,66	5,72	5,97	5,95	6,68	6,37
Resistência à compressão (MPa)	33,26	28,57	29,82	29,72	33,36	31,81
<i>Média (MPa)</i>						31,09
<i>Desvio padrão (MPa)</i>						2,01
<i>Coefficiente de variação (%)</i>						6,48

CB600L**CBCA calcinada a 600°C – CB600L – sem moagem e resfriada lentamente**

Corpos-de-prova	CB600L 1	CB600L 2	CB600L 3	CB600L 4	CB600L 5	CB600L 6
Carga (toneladas)	2,63	2,62	2,66	3,09	3,24	3,09
Resist. à comp. (MPa)	13,14	13,10	13,30	15,42	16,20	15,42
<i>Média (MPa)</i>						14,43
<i>Desvio padrão (MPa)</i>						1,40
<i>Coefficiente de variação (%)</i>						9,70

CBCA calcinada a 600°C – CB600L3 – finura Blaine 300 m²/kg e resfriada lentamente

Corpos-de-prova	CB600L3 1	CB600L3 2	CB600L3 3	CB600L3 4	CB600L3 5	CB600L3 6
Carga (toneladas)	3,73	3,97	3,96	3,91	3,53	3,91
Resist. à comp. (MPa)	18,64	19,83	19,80	19,54	17,64	19,54
<i>Média (MPa)</i>						19,17
<i>Desvio padrão (MPa)</i>						0,86
<i>Coefficiente de variação (%)</i>						4,50

CBCA calcinada a 600°C – CB600L4 – finura Blaine 400 m²/kg e resfriada lentamente

Corpos-de-prova	CB600L4 1	CB600L4 2	CB600L4 3	CB600L4 4	CB600L4 5	CB600L4 6
Carga (toneladas)	6,09	5,95	5,80	6,04	6,13	5,84
Resist. à comp. (MPa)	30,42	29,72	28,97	30,17	30,62	29,17
<i>Média (MPa)</i>						29,84
<i>Desvio padrão (MPa)</i>						0,67
<i>Coefficiente de variação (%)</i>						2,26

CBCA calcinada a 600°C – CB600L5 – finura Blaine 500 m²/kg e resfriada lentamente

Corpos-de-prova	CB600L5 1	CB600L5 2	CB600L5 3	CB600L5 4	CB600L5 5	CB600L5 6
Carga (toneladas)	6,25	6,12	6,89	5,78	6,18	5,85
Resist. à comp. (MPa)	31,22	30,57	34,41	28,87	30,87	29,22

Média (MPa) 30,86
Desvio padrão (MPa) 1,97
Coefficiente de variação (%) 6,40

CB700L**CBCA calcinada a 700°C – CB700L – sem moagem e resfriada lentamente**

Corpos-de-prova	CB700L 1	CB700L 2	CB700L 3	CB700L 4	CB700L 5	CB700L 6
Carga (toneladas)	2,80	2,74	2,84	2,57	3,10	2,93
Resist. à comp. (MPa)	13,97	13,68	14,20	12,81	15,49	14,62

Média (MPa) 14,13
Desvio padrão (MPa) 0,90
Coefficiente de variação (%) 6,36

CBCA calcinada a 700°C – CB700L3 – finura Blaine 300 m²/kg e resfriada lentamente

Corpos-de-prova	CB700L3 1	CB700L3 2	CB700L3 3	CB700L3 4	CB700L3 5	CB700L3 6
Carga (toneladas)	4,73	3,86	4,32	4,33	3,98	3,96
Resist. à comp. (MPa)	23,63	19,25	21,57	21,60	19,90	19,80

Média (MPa) 20,96
Desvio padrão (MPa) 1,63
Coefficiente de variação (%) 7,79

CBCA calcinada a 700°C – CB700L4 – finura Blaine 400 m²/kg e resfriada lentamente

Corpos-de-prova	CB700L4 1	CB700L4 2	CB700L4 3	CB700L4 4	CB700L4 5	CB700L4 6
Carga (toneladas)	5,86	5,72	5,92	5,81	5,14	5,61
Resist. à comp. (MPa)	29,27	28,57	29,57	29,02	25,67	28,02

Média (MPa) 28,35
Desvio padrão (MPa) 1,42
Coefficiente de variação (%) 5,01

CBCA calcinada a 700°C – CB700L5 – finura Blaine 500 m²/kg e resfriada lentamente

Corpos-de-prova	CB700L5 1	CB700L5 2	CB700L5 3	CB700L5 4	CB700L5 5	CB700L5 6
Carga (toneladas)	6,15	6,64	6,26	6,32	5,82	6,36
Resist. à comp. (MPa)	30,72	33,16	31,27	31,57	29,07	31,76

Média (MPa) 31,26
Desvio padrão (MPa) 1,35
Coefficiente de variação (%) 4,31

CB800L**CBCA calcinada a 800°C – CB800L – sem moagem e resfriada lentamente**

Corpos-de-prova	CB800L 1	CB800L 2	CB800L 3	CB800L 4	CB800L 5	CB800L 6
Carga (toneladas)	2,71	3,14	2,86	2,62	3,18	3,18
Resist. à comp. (MPa)	13,52	15,68	14,26	13,07	15,87	15,91

Média (MPa) 14,72
Desvio padrão (MPa) 1,27
Coefficiente de variação (%) 8,60

CBCA calcinada a 800°C – CB800L3 – finura Blaine 300 m²/kg e resfriada lentamente

Corpos-de-prova	CB800L3 1	CB800L3 2	CB800L3 3	CB800L3 4	CB800L3 5	CB800L3 6
Carga (toneladas)	4,24	4,20	4,03	4,47	3,97	3,90
Resist. à comp. (MPa)	21,19	20,96	20,12	22,31	19,83	19,48

Média (MPa) 20,65
Desvio padrão (MPa) 1,05
Coefficiente de variação (%) 5,06

CBCA calcinada a 800°C – CB800L4 – finura Blaine 400 m²/kg e resfriada lentamente

Corpos-de-prova	CB800L4 1	CB800L4 2	CB800L4 3	CB800L4 4	CB800L4 5	CB800L4 6
Carga (toneladas)	5,18	5,05	5,01	4,90	4,53	5,09
Resist. à comp. (MPa)	25,87	25,22	25,02	24,47	22,63	25,42

Média (MPa) 24,77
Desvio padrão (MPa) 1,15
Coefficiente de variação (%) 4,64

CBCA calcinada a 800°C – CB800L5 – finura Blaine 500 m²/kg e resfriada lentamente

Corpos-de-prova	CB800L5 1	CB800L5 2	CB800L5 3	CB800L5 4	CB800L5 5	CB800L5 6
Carga (toneladas)	5,41	5,71	5,16	5,72	5,73	5,93
Resist. à comp. (MPa)	27,02	28,52	25,77	28,57	28,62	29,62

<i>Média (MPa)</i>	28,02
<i>Desvio padrão (MPa)</i>	1,38
<i>Coeficiente de variação (%)</i>	4,92

NBR 5752 – CBCA resfriada rapidamente**CB600R****CBCA calcinada a 600°C – CB600R – sem moagem e resfriada rapidamente**

Corpos-de-prova	CB600R 1	CB600R 2	CB600R 3	CB600R 4	CB600R 5	CB600R 6
Carga (toneladas)	2,97	2,55	2,97	3,04	2,79	3,08
Resist. à comp. (MPa)	14,83	12,74	14,83	15,18	13,93	15,38

<i>Média (MPa)</i>	14,48
<i>Desvio padrão (MPa)</i>	0,99
<i>Coeficiente de variação (%)</i>	6,83

CBCA calcinada a 600°C – CB600R3 – finura Blaine 300 m²/kg e resfriada rapidamente

Corpos-de-prova	CB600R3 1	CB600R3 2	CB600R3 3	CB600R3 4	CB600R3 5	CB600R3 6
Carga (toneladas)	4,92	5,08	5,08	4,75	4,81	4,66
Resist. à comp. (MPa)	24,57	25,37	25,37	23,72	24,02	23,27

<i>Média (MPa)</i>	24,39
<i>Desvio padrão (MPa)</i>	0,87
<i>Coeficiente de variação (%)</i>	3,57

CBCA calcinada a 600°C – CB600R4 – finura Blaine 400 m²/kg e resfriada rapidamente

Corpos-de-prova	CB600R4 1	CB600R4 2	CB600R4 3	CB600R4 4	CB600R4 5	CB600R4 6
Carga (toneladas)	5,65	5,57	5,21	5,56	5,48	5,78
Resist. à comp. (MPa)	28,22	27,82	26,02	27,77	27,37	28,87

<i>Média (MPa)</i>	27,68
<i>Desvio padrão (MPa)</i>	0,96
<i>Coeficiente de variação (%)</i>	3,46

CBCA calcinada a 600°C – CB600R5 – finura Blaine 500 m²/kg e resfriada rapidamente

Corpos-de-prova	CB600R5 1	CB600R5 2	CB600R5 3	CB600R5 4	CB600R5 5	CB600R5 6
Carga (toneladas)	5,13	5,79	5,39	5,82	5,25	5,32
Resist. à comp. (MPa)	25,62	28,92	26,92	29,07	26,22	26,57

<i>Média (MPa)</i>	27,22
<i>Desvio padrão (MPa)</i>	1,44
<i>Coeficiente de variação (%)</i>	5,29

CB700R**CBCA calcinada a 700°C – CB700R – sem moagem e resfriada rapidamente**

Corpos-de-prova	CB700R 1	CB700R 2	CB700R 3	CB700R 4	CB700R 5	CB700R 6
Carga (toneladas)	3,11	3,25	2,77	3,17	3,06	2,89
Resist. à comp. (MPa)	15,53	16,23	13,83	15,83	15,28	14,43

<i>Média (MPa)</i>	15,19
<i>Desvio padrão (MPa)</i>	0,90
<i>Coeficiente de variação (%)</i>	5,91

CBCA calcinada a 700°C – CB700R3 – finura Blaine 300 m²/kg e resfriada rapidamente

Corpos-de-prova	CB700R3 1	CB700R3 2	CB700R3 3	CB700R3 4	CB700R3 5	CB700R3 6
Carga (toneladas)	4,55	4,44	4,27	4,66	4,36	4,55
Resist. à comp. (MPa)	22,72	22,18	21,33	23,27	21,78	22,72

<i>Média (MPa)</i>	22,33
<i>Desvio padrão (MPa)</i>	0,06
<i>Coeficiente de variação (%)</i>	4,98

CBCA calcinada a 700°C – CB700R4 – finura Blaine 400 m²/kg e resfriada rapidamente

Corpos-de-prova	CB700R4 1	CB700R4 2	CB700R4 3	CB700R4 4	CB700R4 5	CB700R4 6
Carga (toneladas)	5,71	5,10	4,92	4,93	5,53	5,19
Resist. à comp. (MPa)	28,52	25,47	24,57	24,62	27,62	25,92

<i>Média (MPa)</i>	26,12
<i>Desvio padrão (MPa)</i>	1,62
<i>Coeficiente de variação (%)</i>	6,20

CBCA calcinada a 700°C – CB700R5 – finura Blaine 500 m²/kg e resfriada rapidamente

Corpos-de-prova	CB700R5 1	CB700R5 2	CB700R5 3	CB700R5 4	CB700R5 5	CB700R5 6
Carga (toneladas)	5,93	5,95	5,29	5,79	5,18	5,63
Resist. à comp. (MPa)	29,62	29,72	26,42	28,92	25,87	28,12

<i>Média (MPa)</i>	28,11
<i>Desvio padrão (MPa)</i>	1,64
<i>Coeficiente de variação (%)</i>	5,82

CB800R**CBCA calcinada a 800°C – CB800R – sem moagem e resfriada rapidamente**

Corpos-de-prova	CB800R 1	CB800R 2	CB800R 3	CB800R 4	CB800R 5	CB800R 6
Carga (toneladas)	3,47	3,06	3,34	3,27	3,41	2,98
Resist. à comp. (MPa)	17,33	15,28	16,68	16,33	17,03	14,88

<i>Média (MPa)</i>	16,26
<i>Desvio padrão (MPa)</i>	0,98
<i>Coeficiente de variação (%)</i>	6,01

CBCA calcinada a 800°C – CB800R3 – finura Blaine 300 m²/kg e resfriada rapidamente

Corpos-de-prova	CB800R3 1	CB800R3 2	CB800R3 3	CB800R3 4	CB800R3 5	CB800R3 6
Carga (toneladas)	5,67	5,28	5,24	4,26	4,83	5,07
Resist. à comp. (MPa)	28,32	26,37	26,17	21,28	24,12	25,32

<i>Média (MPa)</i>	25,26
<i>Desvio padrão (MPa)</i>	2,39
<i>Coeficiente de variação (%)</i>	9,46

CBCA calcinada a 800°C – CB800R4 – finura Blaine 400 m²/kg e resfriada rapidamente

Corpos-de-prova	CB800R4 1	CB800R4 2	CB800R4 3	CB800R4 4	CB800R4 5	CB800R4 6
Carga (toneladas)	5,35	5,20	5,08	4,85	5,36	4,93
Resist. à comp. (MPa)	26,72	25,97	25,37	24,22	26,77	24,62

<i>Média (MPa)</i>	25,61
<i>Desvio padrão (MPa)</i>	1,06
<i>Coeficiente de variação (%)</i>	4,16

CBCA calcinada a 800°C – CB800R5 – finura Blaine 500 m²/kg e resfriada rapidamente

Corpos-de-prova	CB800R5 1	CB800R5 2	CB800R5 3	CB800R5 4	CB800R5 5	CB800R5 6
Carga (toneladas)	5,41	5,56	5,01	5,57	5,81	5,76
Resist. à comp. (MPa)	27,02	27,77	25,02	27,82	29,02	28,77

<i>Média (MPa)</i>	27,57
<i>Desvio padrão (MPa)</i>	1,44
<i>Coeficiente de variação (%)</i>	5,24

NBR 5752 – Metacaulim**MTC - Metacaulim**

Corpos-de-prova	MTC 1	MTC 2	MTC 3	MTC 4	MTC 5	MTC 6
Carga (toneladas)	7,53	7,62	8,75	8,25	7,35	7,75
Resist. à comp. (MPa)	37,61	38,06	43,70	41,20	36,71	38,71
<i>Média (MPa)</i>						39,33
<i>Desvio padrão (MPa)</i>						2,63
<i>Coefficiente de variação (%)</i>						6,67

NBR 5752Modificada – CBCA resfriada lentamente**CAN****CBCA “in natura” – CAN – sem moagem**

Corpos-de-prova	CAN 1	CAN 2	CAN 3	CAN 4	CAN 5	CAN 6
Carga (toneladas)	3,34	3,15	3,30	3,05	3,26	3,22
Resistência à compressão (MPa)	16,68	15,73	16,48	15,23	16,28	16,08
<i>Média (MPa)</i>						16,08
<i>Desvio padrão (MPa)</i>						0,53
<i>Coefficiente de variação (%)</i>						3,29

CBCA “in natura” – CAN3 – finura Blaine 300 m²/kg

Corpos-de-prova	CAN3 1	CAN3 2	CAN3 3	CAN3 4	CAN3 5	CAN3 6
Carga (toneladas)	5,38	5,21	5,30	5,54	5,53	5,71
Resistência à compressão (MPa)	26,87	26,02	26,47	27,67	27,62	28,52
<i>Média (MPa)</i>						27,19
<i>Desvio padrão (MPa)</i>						0,91
<i>Coefficiente de variação (%)</i>						3,36

CBCA “in natura” – CAN4 – finura Blaine 400 m²/kg

Corpos-de-prova	CAN4 1	CAN4 2	CAN4 3	CAN4 4	CAN4 5	CAN4 6
Carga (toneladas)	6,17	5,34	5,66	5,75	5,93	6,04
Resistência à compressão (MPa)	30,82	26,67	28,27	28,72	29,62	30,17
<i>Média (MPa)</i>						29,04
<i>Desvio padrão (MPa)</i>						1,49
<i>Coefficiente de variação (%)</i>						5,12

CB600L**CBCA calcinada a 600°C – CB600L – sem moagem e resfriada lentamente**

Corpos-de-prova	CB600L 1	CB600L 2	CB600L 3	CB600L 4	CB600L 5	CB600L 6
Carga (toneladas)	3,10	2,82	3,26	2,98	2,75	2,86
Resist. à comp. (MPa)	15,48	14,08	16,28	14,88	13,73	14,28
<i>Média (MPa)</i>						14,79
<i>Desvio padrão (MPa)</i>						0,96
<i>Coefficiente de variação (%)</i>						6,47

CBCA calcinada a 600°C – CB600L3 – finura Blaine 300 m²/kg e resfriada lentamente

Corpos-de-prova	CB600L3 1	CB600L3 2	CB600L3 3	CB600L3 4	CB600L3 5	CB600L3 6
Carga (toneladas)	5,24	5,67	5,09	5,67	5,60	5,06
Resist. à comp. (MPa)	26,17	28,32	25,42	28,32	27,97	25,27
<i>Média (MPa)</i>						26,91
<i>Desvio padrão (MPa)</i>						1,45
<i>Coefficiente de variação (%)</i>						5,39

CB700L**CBCA calcinada a 700°C – CB700L – sem moagem e resfriada lentamente**

Corpos-de-prova	CB700L 1	CB700L 2	CB700L 3	CB700L 4	CB700L 5	CB700L 6
Carga (toneladas)	4,04	4,52	4,16	3,84	3,89	3,66
Resist. à comp. (MPa)	20,18	22,58	20,78	19,18	19,43	18,28
<i>Média (MPa)</i>						20,07
<i>Desvio padrão (MPa)</i>						1,50
<i>Coefficiente de variação (%)</i>						7,46

CB800L**CBCA calcinada a 800°C – CB800L – sem moagem e resfriada lentamente**

Corpos-de-prova	CB800L 1	CB800L 2	CB800L 3	CB800L 4	CB800L 5	CB800L 6
Carga (toneladas)	3,72	3,46	3,46	3,57	3,66	3,40
Resist. à comp. (MPa)	18,58	17,28	17,28	17,83	18,28	16,98
<i>Média (MPa)</i>						17,71
<i>Desvio padrão (MPa)</i>						0,63
<i>Coefficiente de variação (%)</i>						3,57

CBCA calcinada a 800°C – CB800L3 – finura Blaine 300 m²/kg e resfriada lentamente

Corpos-de-prova	CB800L3 1	CB800L3 2	CB800L3 3	CB800L3 4	CB800L3 5	CB800L3 6
Carga (toneladas)	4,18	4,63	4,22	4,09	5,17	4,92
Resist. à comp. (MPa)	20,88	23,12	21,08	20,43	25,82	24,57

<i>Média (MPa)</i>	22,65
<i>Desvio padrão (MPa)</i>	2,22
<i>Coefficiente de variação (%)</i>	9,78

NBR 5752Modificada – CBCA resfriada rapidamente**CB600R****CBCA calcinada a 600°C – CB600R – sem moagem e resfriada rapidamente**

Corpos-de-prova	CB600R 1	CB600R 2	CB600R 3	CB600R 4	CB600R 5	CB600R 6
Carga (toneladas)	2,56	2,46	2,44	2,40	2,43	2,37
Resist. à comp. (MPa)	12,79	12,29	12,19	11,99	12,14	11,84

<i>Média (MPa)</i>	12,20
<i>Desvio padrão (MPa)</i>	0,33
<i>Coefficiente de variação (%)</i>	2,67

CBCA calcinada a 600°C – CB600R3 – finura Blaine 300 m²/kg e resfriada rapidamente

Corpos-de-prova	CB600R3 1	CB600R3 2	CB600R3 3	CB600R3 4	CB600R3 5	CB600R3 6
Carga (toneladas)	4,29	3,98	4,08	3,88	4,12	4,55
Resist. à comp. (MPa)	21,43	19,88	20,38	19,38	20,58	22,72

<i>Média (MPa)</i>	20,73
<i>Desvio padrão (MPa)</i>	1,20
<i>Coefficiente de variação (%)</i>	5,78

CBCA calcinada a 600°C – CB600R4 – finura Blaine 400 m²/kg e resfriada rapidamente

Corpos-de-prova	CB600R4 1	CB600R4 2	CB600R4 3	CB600R4 4	CB600R4 5	CB600R4 6
Carga (toneladas)	4,85	4,98	4,82	5,10	5,14	5,14
Resist. à comp. (MPa)	24,22	24,87	24,07	25,47	25,67	25,67

<i>Média (MPa)</i>	25,00
<i>Desvio padrão (MPa)</i>	0,72
<i>Coefficiente de variação (%)</i>	2,89

CBCA calcinada a 600°C – CB600R5 – finura Blaine 500 m²/kg e resfriada rapidamente

Corpos-de-prova	CB600R5 1	CB600R5 2	CB600R5 3	CB600R5 4	CB600R5 5	CB600R5 6
Carga (toneladas)	5,67	5,79	5,63	5,93	5,36	5,46
Resist. à comp. (MPa)	28,32	28,92	28,12	29,62	26,77	27,27

<i>Média (MPa)</i>	28,17
<i>Desvio padrão (MPa)</i>	1,04
<i>Coefficiente de variação (%)</i>	3,71

CB700R**CBCA calcinada a 700°C – CB700R – sem moagem e resfriada rapidamente**

Corpos-de-prova	CB700R 1	CB700R 2	CB700R 3	CB700R 4	CB700R 5	CB700R 6
Carga (toneladas)	3,04	2,89	2,98	3,23	2,87	3,15
Resist. à comp. (MPa)	15,18	14,43	14,88	16,13	14,33	15,73

<i>Média (MPa)</i>	15,12
<i>Desvio padrão (MPa)</i>	0,71
<i>Coefficiente de variação (%)</i>	4,72

CBCA calcinada a 700°C – CB700R3 – finura Blaine 300 m²/kg e resfriada rapidamente

Corpos-de-prova	CB700R3 1	CB700R3 2	CB700R3 3	CB700R3 4	CB700R3 5	CB700R3 6
Carga (toneladas)	4,47	4,35	4,03	4,18	4,07	4,34
Resist. à comp. (MPa)	22,33	21,73	20,13	20,88	20,33	21,68

<i>Média (MPa)</i>	21,18
<i>Desvio padrão (MPa)</i>	0,87
<i>Coefficiente de variação (%)</i>	4,11

CBCA calcinada a 700°C – CB700R4 – finura Blaine 400 m²/kg e resfriada rapidamente

Corpos-de-prova	CB700R4 1	CB700R4 2	CB700R4 3	CB700R4 4	CB700R4 5	CB700R4 6
Carga (toneladas)	5,32	5,02	5,41	4,50	4,93	4,93
Resist. à comp. (MPa)	26,57	25,07	27,02	22,48	24,62	24,62

<i>Média (MPa)</i>	25,06
<i>Desvio padrão (MPa)</i>	1,62
<i>Coefficiente de variação (%)</i>	6,48

CBCA calcinada a 700°C – CB700R5 – finura Blaine 500 m²/kg e resfriada rapidamente

Corpos-de-prova	CB700R5 1	CB700R5 2	CB700R5 3	CB700R5 4	CB700R5 5	CB700R5 6
Carga (toneladas)	5,00	5,07	5,59	5,91	5,55	5,88
Resist. à comp. (MPa)	24,97	25,32	27,92	29,52	27,72	29,37

<i>Média (MPa)</i>	27,47
<i>Desvio padrão (MPa)</i>	1,94
<i>Coeficiente de variação (%)</i>	7,08

CB800R**CBCA calcinada a 800°C – CB800R – sem moagem e resfriada rapidamente**

Corpos-de-prova	CB800R 1	CB800R 2	CB800R 3	CB800R 4	CB800R 5	CB800R 6
Carga (toneladas)	3,25	3,43	3,26	3,00	2,92	3,43
Resist. à comp. (MPa)	16,23	17,13	16,28	14,98	14,58	17,13

<i>Média (MPa)</i>	16,06
<i>Desvio padrão (MPa)</i>	1,07
<i>Coeficiente de variação (%)</i>	6,66

CBCA calcinada a 800°C – CB800R3 – finura Blaine 300 m²/kg e resfriada rapidamente

Corpos-de-prova	CB800R3 1	CB800R3 2	CB800R3 3	CB800R3 4	CB800R3 5	CB800R3 6
Carga (toneladas)	4,68	4,71	4,70	4,58	4,98	5,00
Resist. à comp. (MPa)	23,37	23,52	23,47	22,87	24,87	24,97

<i>Média (MPa)</i>	23,85
<i>Desvio padrão (MPa)</i>	0,86
<i>Coeficiente de variação (%)</i>	3,62

CBCA calcinada a 800°C – CB800R4 – finura Blaine 400 m²/kg e resfriada rapidamente

Corpos-de-prova	CB800R4 1	CB800R4 2	CB800R4 3	CB800R4 4	CB800R4 5	CB800R4 6
Carga (toneladas)	5,03	4,83	4,98	5,38	4,72	5,19
Resist. à comp. (MPa)	25,12	24,12	24,87	26,87	23,57	25,92

<i>Média (MPa)</i>	25,08
<i>Desvio padrão (MPa)</i>	1,20
<i>Coeficiente de variação (%)</i>	4,77

CBCA calcinada a 800°C – CB800R5 – finura Blaine 500 m²/kg e resfriada rapidamente

Corpos-de-prova	CB800R5 1	CB800R5 2	CB800R5 3	CB800R5 4	CB800R5 5	CB800R5 6
Carga (toneladas)	5,62	5,50	5,94	5,94	5,53	5,23
Resist. à comp. (MPa)	28,07	27,47	29,67	29,67	27,62	26,12

<i>Média (MPa)</i>	28,10
<i>Desvio padrão (MPa)</i>	1,38
<i>Coeficiente de variação (%)</i>	4,89

NBR 5752Modificada – Metacaulim**MTC - Metacaulim**

Corpos-de-prova	MTC 1	MTC 2	MTC 3	MTC 4	MTC 5	MTC 6
Carga (toneladas)	8,73	8,92	9,56	8,76	9,18	10,24
Resist. à comp. (MPa)	43,60	44,55	47,75	43,75	45,85	51,14

<i>Média (MPa)</i>	46,11
<i>Desvio padrão (MPa)</i>	2,91
<i>Coeficiente de variação (%)</i>	6,31