

**Estudo da Atividade Pozolânica e da Aplicação em Concreto de Cinzas  
do Bagaço de Cana-de-Açúcar com Diferentes Características Físico-  
Químicas**

**Thaís Ribeiro Barroso**

Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro

Campos dos Goytacazes – RJ

Novembro, 2011

**Estudo da Atividade Pozolânica e da Aplicação em Concreto de Cinzas  
do Bagaço de Cana-de-Açúcar com Diferentes Características Físico-  
Químicas**

**Thaís Ribeiro Barroso**

"Projeto de Dissertação apresentado ao Centro de Ciência e Tecnologia, da Universidade Estadual do Norte Fluminense, como parte das exigências para obtenção de título de Mestre em Engenharia Civil".

Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro

Campos dos Goytacazes – RJ

Novembro, 2011

**Estudo da Atividade Pozolânica e da Aplicação em Concreto de Cinzas  
do Bagaço de Cana-de-Açúcar com Diferentes Características Físico-  
Químicas**

**Thaís Ribeiro Barroso**

"Projeto de Dissertação apresentado ao Centro de Ciência e Tecnologia, da Universidade Estadual do Norte Fluminense, como parte das exigências para obtenção de título de Mestre em Engenharia Civil".

Comissão Examinadora:

---

Prof. Romildo Dias Toledo Filho (D.Sc.) – COPPE/UFRJ

---

Prof. Reila Vargas Velasco (D.Sc.) – COPPE/UFRJ

---

Prof. Dylmar Penteado Dias (D.Sc.) – UENF

---

Prof. Guilherme Chagas Cordeiro (D.Sc.) - UENF  
Orientador

Campos dos Goytacazes – RJ

Novembro, 2011

## **Resumo**

Esta pesquisa teve por finalidade investigar aspectos relacionados à produção e à caracterização de cinzas pozolânicas a partir de duas cinzas residuais do bagaço de cana-de-açúcar, coletadas no Município de Campos dos Goytacazes/RJ, para a produção de argamassas e concretos com substituição parcial de cimento Portland por cinza. As amostras de cinza passaram por processos controlados de moagem em moinho de bolas e queima em laboratório e em escala semi-industrial. Após estes processos, sete cinzas do bagaço distintas foram produzidas e caracterizadas com ensaios de composição química, granulometria, compacidade, superfície específica BET, difração de raios X, índice de atividade pozolânica com cimento Portland, atividade pozolânica Chappelle e condutividade elétrica. A influência da substituição parcial de cimento (0 a 35%, em volume) na resistência à compressão de argamassas foi investigada após 28 dias de cura. De acordo com os resultados obtidos, três diferentes cinzas foram selecionadas para substituição de 20% de cimento em um concreto de 40 MPa de resistência à compressão aos 28 dias. A dosagem foi realizada por meio do Método de Empacotamento Compressível de partículas e as propriedades do concreto avaliadas foram: abatimento do tronco de cone, massa específica, absorção de água e índice de vazios aos 28 dias e resistência à compressão aos 3, 7, 28 e 180 dias de cura. Dentre os resultados obtidos, destaca-se a alta atividade pozolânica das cinzas ultrafinas calcinadas em laboratório e em escala semi-industrial e a adequada resistência mecânica apresentada pelos concretos com as cinzas do bagaço de cana-de-açúcar.

Palavras-chave: bagaço de cana-de-açúcar, cinzas pozolânicas, aplicação em concretos.

## **Abstract**

This work aimed to investigate aspects related to the production and characterization of pozzolanic ashes from two sugar cane bagasse ash, collected in the city of Campos dos Goytacazes / RJ, for the production of mortar and concrete with replacement part of Portland cement with ash. Samples of ash have gone through controlled processes in ball mill grinding and burning in the laboratory and semi-industrial scale. After these procedures, seven distinct ashes of bagasse were produced and characterized with tests of chemical composition, particle size, packing density, specific surface area (BET), X-ray diffraction, pozzolanic index with Portland cement, Chapelle activity and electrical conductivity. The influence of partial replacement of cement (0 to 35% by volume) in the compressive strength of mortars was investigated after 28 days of healing. According to the results, three different ashes were selected for 20% replacement of cement in a concrete 40 MPa compressive strength at 28 days. The measurement was performed using the method of packaging compressible particle and the properties of concrete were: slump test, density, water absorption and voids index to 28 days and compressive strength at 3, 7, 28 and 180 curing days. Among the results, there is a high pozzolanic activity of calcined ultrafine ash in the laboratory and semi-industrial scale and adequate mechanical strength provided by concrete with sugar cane bagasse ash.

## Sumário

1. Introdução.....	1
1.1. Objetivos .....	3
1.2. Justificativa.....	3
2. Revisão Bibliográfica .....	7
2.1. Aditivos minerais .....	7
2.1.1. Pozolanas.....	9
2.1.1.1. Reações pozolânicas .....	10
2.2. Cinzas do bagaço da cana-de-açúcar.....	12
2.2.1. Definição e histórico da cana-de-açúcar .....	12
2.2.2. Bagaço da cana-de-açúcar.....	18
2.3. Aplicação das cinzas do bagaço da cana-de-açúcar em argamassas e concretos .....	19
3. Materiais .....	26
3.1. Cinzas do bagaço da cana-de-açúcar.....	26
3.2. Cimento Portland .....	29
3.2.1. Cimento Portland CPP Classe G .....	29
3.2.2. Cimento Portland de Alta Resistência Inicial .....	31
3.3. Agregados.....	32
3.3.1. Agregado miúdo.....	32
3.3.2. Agregado graúdo .....	34
3.4. Aditivo superplastificante .....	36
3.5. Água.....	36
4. Métodos Experimentais .....	37
4.1. Moagem .....	37
4.2. Calcinação das Cinzas.....	38
4.2.1. Queima em Escala de Laboratório.....	38

4.2.2. Queima em Escala Semi-Industrial.....	40
4.3. Superfície específica.....	43
4.4. Difração de raios X.....	43
4.5. Seleção das cinzas do bagaço.....	44
4.6. Produção e caracterização das argamassas .....	44
4.6.1. Resistência à compressão.....	44
4.6.2. Compacidade experimental .....	48
4.6.2.1. Ensaio de compressão e vibração.....	48
4.6.2.2. Ensaio de demanda d'água .....	50
4.6.3. Atividade pozolânica .....	52
4.6.3.1. Índice de atividade pozolânica com cimento Portland. ....	52
4.6.3.2. Chappelle modificado .....	53
4.6.3.3. Condutividade elétrica .....	54
4.7. Dosagem, produção e caracterização dos concretos .....	55
4.7.1. Dosagem .....	55
4.7.2. Mistura, confecção e cura dos corpos de prova .....	58
4.7.3. Caracterização dos concretos .....	61
4.7.3.1. Resistência à compressão e módulo de elasticidade .....	64
4.8. Metodologia de avaliação estatística para os resultados experimentais .....	66
5. Resultados.....	67
5.1. Influência do tempo de moagem na granulometria das cinzas do bagaço .....	67
5.2. Composição química e mineralógica .....	71
5.3. Difração de raios X.....	75
5.4. Atividade pozolânica .....	80
5.5. Influência da substituição de cimento Portland por CBCA na resistência à compressão de argamassas.....	88

5.6. Seleção das cinzas para emprego em concreto .....	95
5.7. Aplicação das cinzas do bagaço de cana-de-açúcar em um concreto de 40 MPa de resistência à compressão. ....	96
5.7.1. Influência da substituição de cimento por cinzas do bagaço nos valores de índices físicos do concreto .....	96
5.7.2. Influência da substituição de cimento por cinzas do bagaço nas propriedades mecânicas do concreto .....	99
6. Considerações Finais .....	108
6.1. Conclusão .....	108
6.2. Sugestões para trabalhos futuros .....	110
7. Referências Bibliograficas: .....	112
<b>ANEXO A: MODELO DE EMPACOTAMENTO COMPRESSÍVEL (MEC)</b>	<b>118</b>
<b>ANEXO B: DOSAGEM DO CONCRETO NO PROGRAMA BETÓN LAB</b>	<b>123</b>



## Lista de figuras

Figura 2.1 - Representação esquemática de partículas de cimento Portland, (a) sem aditivos, (b) com aditivos superplastificante, (c) adicionando aditivo mineral fino (CORDEIRO, 2006). .....	8
Figura 2.2- Construções antigas com pozolanas: (a) Coliseu e (b) Pantheon. (Fonte: <a href="http://www.wikipedia.org.br">www.wikipedia.org.br</a> ). .....	10
Figura 2.3 - Usina Hidrelétrica de Itaipu, (a) vista frontal, (b) vista lateral. (Fonte: Itaipu, 2010). .....	10
Figura 2.4 – Vista geral (a) e detalhe (b) de uma plantação de cana-de-açúcar no município de Campos dos Goytacazes. ....	13
Figura 2.5 - Venda de automóveis e comerciais leves por tipo de combustível (IBGE, 2011). .....	15
Figura 2.6 – Áreas de concentração de cana-de-açúcar no Brasil (Fonte: IBGE, 2011). .....	16
Figura 2.7 - O processamento da cana-de-açúcar no Brasil (Fonte: IBGE, 2011). .....	17
Figura 2.8 – Bagaço da cana-de-açúcar na esteira da usina Coagro em Campos dos Goytacazes/RJ. ....	19
Figura 2.9 – Valores de índice de atividade pozolânica com cimento Portland de CBCA (FREITAS, 2005). .....	21
Figura 3.1- Usina Coagro, localizada no Município de Campos dos Goytacazes/RJ. ....	27
Figura 3.2- Locais de coleta das cinzas na usina Coagro: (a) retentor de fuligem – CBCA1- <i>in natura</i> , (b) parte inferior da caldeira - CBCA 2- <i>in natura</i> . .....	28
Figura 3.3 – Curva granulométrica do cimento Portland CPP Classe G. ...	31
Figura 3.4 - Distribuição granulométrica do agregado miúdo do Rio Paraíba do Sul (Campos dos Goytacazes/RJ). ....	33
Figura 3.5 - Classes da granulometria da areia: (a) classe $A_1 < 0,42$ mm, (b) classe $A_2 > 0,42$ mm. ....	34
Figura 3.6 - Distribuição granulométrica da brita. ....	35
Figura 3.7– Classes de granulometria da brita: (a) classe $B1 < 6,3$ mm e (b) classe $B2 > 6,3$ mm. ....	35

Figura 4.1- Moinho de bolas do LECIV (Sonnex).....	37
Figura 4.2- Forno tipo mufla do Laboratório de Estruturas da COPPE/UFRJ. .....	39
Figura 4.3- Aspecto da CBCA 2 na mufla: (a) antes da queima, (b) após a queima. ....	39
Figura 4.4 - Forno tipo abóboda da Art Cerâmica Sardinha.....	40
Figura 4.6 – Cinza CBCA 2 no recipiente cerâmico (a) antes da queima e (b) após a queima.....	41
Figura 4.7 – (a) Recipiente com CBCA1 no forno e (b) detalhe do recipiente. .....	41
Figura 4.8 - Posicionamento de dois termopares em um das entradas do Forno 2 da Art Cerâmica. ....	42
Figura 4.9 - Gráfico temperatura <i>versus</i> tempo de queima no forno da cerâmica.....	42
Figura 4.10 - Cinzas coletadas e produzidas durante a pesquisa. ....	44
Figura 4.11 – Etapas da preparação da argamassa: (a) misturador de bancada; (b) mistura de água, superplastificante, cimento e cinza; (c) adição progressiva de areia; (d) mistura final. ....	46
Figura 4.12 – Moldagem dos corpos de prova: (a) preenchimento das camadas; (b) e vibração em mesa vibratória.....	47
Figura 4.13 – Corpo de prova desmoldado (a) após ser submetido a uma película de água e (b) sendo envolvido pelo filme plástico. ....	47
Figura 4.14 – (a) Faceamento e (b) ruptura de um corpo de prova no LABEST/COPPE.....	48
Figura 4.15 - Etapas do ensaio de compactação: (a) introdução da amostra no cilindro, (b) posicionamento do pistão que exerce 10 kPa submetido a vibração e (c) leitura da posição do pistão após a vibração.....	49
Figura 4.16 - Aspectos das amostras (a) B <sub>1</sub> e (b) B <sub>2</sub> após o ensaio de compactação.....	50
Figura 4.17 - Fases do empacotamento no ensaio de demanda d'água: material seco (a), fase pendular (b), fase funicular (c) e início da fase capilar (d).....	51
Figura 4.18 - Tela final de dosagem no programa Betonlab Pro2®. ....	57

Figura 4.19 – Etapas de produção dos concretos na betoneira: (a) colocação do cimento e brita; (b) aspecto após mistura inicial 60 s; (c) colocação de 70% da água na mistura; (d) aspecto após mistura de mais 60 s; (e) inclusão da areia; (f) betoneira parada por 120 s; (g) aspecto da mistura final. ....	59
Figura 4.20 – Corpo de prova do concreto confeccionado com CBCA 2: (a) Moldagem em duas camadas; (b) a vibração com vibrador posicionado externamente ao molde.....	60
Figura 4.21 – Corpos de prova com CBCA2 (a) mantidos por 24 h nos moldes e (b) cobertos com pano úmido para evitar a perda de umidade...	61
Figura 4.22 – Ensaio de abatimento do tronco de cone de Abrams do concreto com a cinza CBCA 2, realizado no LECIV/UENF. ....	62
Figura 4.23 – Corpo de prova com 20 cm de altura e 10 cm de diâmetro cortado em 3 partes com 5 cm de altura. ....	63
Figura 4.24 – Etapas do corpo de prova no ensaio de absorção: (a) secagem em estufa, (b) pesagem da amostra saturada e imersa em água, (c) pesagem da amostra saturada em superfície seca. ....	64
Figura 4.25- Ensaio de resistência a compressão: (a) corpo de prova sendo ensaiado na prensa; (b) detalhe.....	65
Figura 5.1 – Distribuição granulométrica da CBCA 1 em diferentes tempos de moagem. ....	68
Figura 5.2 - Distribuição granulométrica da CBCA 2 em diferentes tempos de moagem. ....	69
Figura 5.3 - Distribuição granulométrica das cinzas do bagaço. ....	70
Figura 5.4 – Difratoograma de raios X da CBCA1.....	76
Figura 5.5 – Difratoograma de raios X da CBCA2.....	76
Figura 5.6 - Difratoograma de raios X da CBCA1-600-3h.....	77
Figura 5.7 - Difratoograma de raios X da CBCA1-600-6h.....	78
Figura 5.8 - Difratoograma de raios X da CBCA1-CER.....	78
Figura 5.9 – Difratoograma de raios X da CBCA2-600-3h. ....	79
Figura 5.10 – Difratoograma de raios X da CBCA2–CER. ....	80
Figura 5.11 - Índice de atividade pozolânica das cinzas. ....	81
Figura 5.12 - Valores de atividade pozolânica das cinzas (método Chapelle modificado).....	82
Figura 5.13 - Variação da condutividade elétrica com o tempo das cinzas.	83

Figura 5.14 - Variação de condutividade elétrica das cinzas após 2 minutos. .....	84
Figura 5.15 - Correlação entre os ensaios de índice de atividade pozolânica (%) e Chapelle (mg/g). ....	85
Figura 5.16 - Correlação entre os métodos de índice de atividade pozolânica (%) e condutividade elétrica (mS/cm).....	86
Figura 5.17 - Correlação entre os métodos de Chapelle (mg/g) e condutividade elétrica (mS/cm). ....	87
Figura 5.18 - Resistência à compressão das argamassas confeccionadas com substituição parcial de cimento por CBCA1.....	89
Figura 5.19 - Resistência a compressão das argamassas confeccionadas com substituição parcial de cimento por CBCA2.....	90
Figura 5.20 - Resistência a compressão das argamassas confeccionadas com substituição parcial de cimento por CBCA1-600-3h e CBCA1-600-6h.	91
Figura 5.21 - Resistência a compressão das argamassas confeccionadas com substituição parcial de cimento por CBCA1-CER.....	92
Figura 5.22- Resistência a compressão das argamassas confeccionadas com substituição parcial de cimento por CBCA2-600-3h. ....	93
Figura 5.23 - Resistência a compressão das argamassas confeccionadas com substituição parcial de cimento por CBCA2-CER. ....	94
Figura 5.24 - Resistência à compressão das argamassas com as cinzas de bagaço para os diferentes teores de substituição de cimento.....	96
Figura 5.25 – Valores de índice de vazios (%) dos concretos confeccionados. .....	97
Figura 5.26 – Valores de absorção (%) dos concretos.....	98
Figura 5.27 – Valores de massa específica (kg/m <sup>3</sup> ) dos concretos. ....	99
Figura 5.28 - Curvas tensão-deformação dos concretos após 3 dias de cura. .....	100
Figura 5.29 - Curvas tensão-deformação dos concretos após 7 dias de cura. .....	102
Figura 5.30 - Curvas tensão-deformação dos concretos após 28 dias de cura. ....	104
Figura 5.31 - Curvas tensão-deformação dos concretos após 180 dias de cura. ....	106

## Lista de tabelas

Tabela 2.1 – Resíduos gerados pela cana-de-açúcar (HEMERLY, 1999).	18
Tabela 3.1- Composição química (percentual em massa) das cinzas do bagaço in natura.....	29
Tabela 3.2 – Composição química do Cimento Portland CPP – Classe G.	30
Tabela 3.3 – Composição química do Cimento Portland de alta resistência inicial. ....	31
Tabela 3.4 – Características físicas e mecânicas do cimento Portland de alta resistência inicial. ....	32
Tabela 3.5 – Características físicas da areia quartzosa média. ....	33
Tabela 3.6 - Composição mineralógica do charnoquito de Campos dos Goytacazes/RJ. ....	34
Tabela 3.7 – Características físicas e mecânicas do agregado graúdo. ....	36
Tabela 4.1 – Dosagens das argamassas confeccionadas no ensaio de índice de atividade pozolânica com cimento Portland. ....	53
Tabela 4.2- Tabela de classificação pozolanicidade do material, proposta por Lúxan <i>et al.</i> (1989). ....	54
Tabela 4.3 – Propriedades dos constituintes para a criação do banco de dados. ....	56
Tabela 4.4- Composição dos concretos. ....	58
Tabela 5.1 – Diâmetro médio das cinzas estudadas.....	71
Tabela 5.2 – Composição química (% em massa) das cinzas geradas a partir da cinza CBCA1– <i>in natura</i> . ....	72
Tabela 5.3 - Composição química das cinzas geradas a partir da cinza CBCA2– <i>in natura</i> . ....	73
Tabela 5.4 – Valores de massa específica e compacidade das cinzas estudadas.....	74
Tabela 5.5 – Valores médios de resistência à compressão, módulo de elasticidade e deformação de pico dos concretos, aos 3 dias, com os respectivos valores de desvio padrão. ....	101

Tabela 5.6 - Valores médios de resistência à compressão, módulo de elasticidade e deformação de pico dos concretos, aos 7 dias, com os respectivos valores de desvio padrão. ....	102
Tabela 5.7 - Valores médios de resistência à compressão, módulo de elasticidade e deformação de pico dos concretos, aos 28 dias, com os respectivos valores de desvio padrão. ....	104
Tabela 5.8 - Valores médios de resistência à compressão, módulo de elasticidade e deformação de pico dos concretos, aos 180 dias, com os respectivos valores de desvio padrão. ....	106

## 1. Introdução

O principal material da engenharia utilizado, desde a antiguidade, pela humanidade é o concreto proveniente do cimento Portland. Misturas contendo compostos aglomerantes e agregados juntamente com a água tem sido empregadas nas construções estruturais, resistindo a diversas degradações ambientais, mesmo após milhares de anos. O concreto apresenta diversas aplicações como edificações de variados pavimentos, pontes, viadutos e barragens. O que condiciona isto são características como a alta resistência mecânica, o custo relativamente baixo, a versatilidade de formas e a rapidez no desenvolvimento da estrutura (GARTNER, 2004).

Como o concreto tem como seu principal constituinte o cimento Portland, é de suma importância analisar as conseqüências que este material acarreta para o meio ambiente. De acordo com Mehta (2002), para cada tonelada de clínquer produzido pela indústria cimentícia mundial, uma tonelada de dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ) é lançada para o planeta. Além desse, outros gases são emitidos em menores escalas, como monóxido de carbono (CO), metano ( $\text{CH}_4$ ), dióxido de nitrogênio ( $\text{NO}_2$ ), dióxido de enxofre ( $\text{SO}_2$ ), entre outros. A liberação de dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ) pela indústria de cimento é conseqüência da calcinação do calcário e da queima de combustíveis fósseis nas etapas da fabricação do clínquer (CORDEIRO, 2006). E essas taxas tendem a aumentar com o passar dos anos e com o processo de desenvolvimento dos países.

Dentro deste cenário, aumenta o interesse na utilização de outros tipos de materiais com o objetivo de substituir parcialmente o cimento. Segundo GANESAN *et al.* (2007), o uso de resíduos industriais ou agro-industriais na fabricação de concretos e argamassas se mostra uma solução satisfatória tanto para os problemas ambientais como para os associados à gestão de resíduos. Além disso, estudos comprovam que a incorporação de materiais pozolânicos ao concreto, traz benefícios à reologia, durabilidade e nas propriedades mecânicas dos materiais

(CHUSILP, 2009). Como exemplo destes aditivos minerais pode-se destacar a cinza do bagaço da cana-de-açúcar, cinza volante, escória de alto-forno, sílica ativa, metacaulinita e a cinza da casca de arroz.

Aditivos como a cinza do bagaço da cana-de-açúcar encontra um grande mercado em países como o Brasil, abundante na produção agroindustrial, onde a cana-de-açúcar representa uma das maiores atividades. De acordo com dados da ÚNICA (2011), o cultivo de cana-de-açúcar ocupa cerca de 7 milhões de hectares ou cerca de 2% de toda a terra arável do Brasil, que é o maior produtor mundial. Mas, o bagaço da cana-de-açúcar é o maior resíduo da agroindústria brasileira. Para cada tonelada de cana-de-açúcar, 260 kg de bagaço são gerados (CORTEZ *et al.*, 1992). Estima-se que, a cada ano, sobrem de 5 a 12 milhões de toneladas deste material, que corresponde a aproximadamente 30% da cana moída.

Segundo o IBGE (2011), no ano de 2010 foi constatado um aumento na produção dos derivados da cana-de-açúcar de 15,7%, o que é justificado pelo acréscimo tanto na produção de açúcar (20,1%), como na de álcool (11,9%), reflexos principalmente da necessidade de suprir a demanda de álcool, intensificada pelo motor bi-combustível.

O crescimento na produção de cana-de-açúcar aliado a fatores como gestão de resíduos e vantagens que os aditivos minerais vêm apresentando aos concretos e argamassas condicionam cada vez mais pesquisas relacionadas à introdução desta cinza na fabricação dos concretos. Além destes, outros fatores devem ser levados em consideração como, por exemplo, o desenvolvimento dos países, que acarreta um crescimento estrutural. Sendo assim, estruturas cada vez mais arrojadas estão sendo construídas, gerando a necessidade de concretos com elevados desempenhos. Porém se preocupar com as questões ambientais, visando à diminuição da emissão de gases poluentes gerados, por exemplo, durante a fabricação do clínquer, é um imperativo.



## 1.1. Objetivos

Essa pesquisa tem por objetivo investigar aspectos relacionados à produção e à caracterização de cinzas pozolânicas, a partir de cinzas residuais do bagaço de cana-de-açúcar, para a produção de argamassas e concretos com substituição parcial de cimento Portland por cinza. Desta forma, o trabalho foi dividido em três etapas, que definem os objetivos específicos da pesquisa, a saber:

A primeira etapa compreendeu um estudo dos procedimentos experimentais de produção e caracterização de cinzas pozolânicas ultrafinas a partir de resíduos da queima do bagaço de cana-de-açúcar utilizado como biomassa. A caracterização foi feita através de ensaios de composição química, granulometria, superfície específica, difração de raios X, atividade pozolânica e resistência a compressão. Na segunda etapa foi realizado um estudo de argamassas com diferentes teores de substituição de cimento pelas cinzas produzidas. Nesta etapa, foram definidas as cinzas e o teor de substituição para a confecção dos concretos. A terceira etapa consistiu na fabricação e caracterização de concretos com resistência usual na construção civil ( $f_{ck28} \approx 40$  MPa) no Brasil. A dosagem do concreto de referência foi desenvolvida pelo Método de Empacotamento Compressível (MEC) das Partículas (DE LARRARD, 1999), que é um procedimento científico de dosagem que possibilita a seleção e otimização dos constituintes do concreto, aumentando a compacidade da mistura granular e diminuindo o risco de segregação. Nesta fase foram analisadas as seguintes propriedades: abatimento do tronco de cone, massa específica, absorção, índice de vazios e resistência a compressão.

## 1.2. Justificativa

O desenvolvimento econômico e social de regiões como a Norte Fluminense gera o interesse em pesquisar resíduos agroindustriais

gerados em grande abundância na região. Um interesse particular diz respeito aos resíduos que possam ser utilizados como aditivos minerais, tendo em vista a quantidade de gases poluentes que são emitidos para a atmosfera, principalmente o dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>), na fabricação do cimento Portland.

A substituição parcial de cimento por cinzas residuais, como a do bagaço da cana-de-açúcar, em pastas, argamassas e concretos encontra-se entre as opções para minimizar o lançamento de gases intensificadores do efeito estufa. Entre suas vantagens destaca-se a adequada composição química, grande disponibilidade no mercado sucro-alcooleiras, produção descentralizada e uma perspectiva de crescimento em sua produção com o crescimento das regiões, levando em conta a necessidade de suprir a demanda de açúcar e álcool que vem crescendo, decorrente de novas tecnologias, como por exemplo, o motor bicom bustível (CORDEIRO, 2006; FAIRBAIRN *et al.*, 2010).

Com isso, estudos relacionados à aplicação de cinzas agroindustriais abundantes na região tornaram-se importantes, porque possibilitam a produção de argamassas e concretos com maior resistência e durabilidade, além de promover uma possível redução dos custos e dos impactos ambientais decorrentes da emissão de gases poluentes, durante as etapas de fabricação do clínquer, e da disposição de resíduos.

Este trabalho representa uma continuação de estudos na UENF relacionados à utilização de cinzas do bagaço da cana-de-açúcar como, que foi iniciado em 2002 por Freitas (2005).

### 1.3. Organização da dissertação

A dissertação foi escrita em 7 Capítulos e 2 anexos, conforme a divisão a seguir:

Capítulo 1: É o capítulo de introdução ao tema, onde traz a importância, os objetivos e as justificativas do tema em estudo. Além disto, apresenta a estrutura do trabalho;

Capítulo 2: Este capítulo é dedicado a revisão bibliográfica da pesquisa. Inicialmente, são abordados temas como aditivos minerais (definição e os efeitos físicos e químicos que acarretam), definição de atividade pozolânica, exemplos de utilização e a forma como estas reagem com os materiais (reações pozolânicas). Além disto, é feito um breve apanhado histórico da cana-de-açúcar e seus resíduos, com ênfase na cinza do bagaço (objeto deste estudo). Por fim, são apresentadas pesquisas onde foram utilizadas cinzas do bagaço da cana como pozolana em argamassas e concretos;

Capítulo 3: Apresenta os materiais (devidamente caracterizados) que estão sendo utilizados na pesquisa;

Capítulo 4: Descreve os métodos de ensaios empregados para a caracterização das cinzas pozolânicas e para a dosagem, produção e caracterização das argamassas e dos concretos confeccionados. Além disto, apresenta o método estatístico adotado para a análise dos resultados experimentais;

Capítulo 5: Este capítulo traz os resultados obtidos na pesquisa nas etapas de caracterização das cinzas produzidas, após um estudo de moagem e calcinação, em que foram selecionadas 3 das 7 cinzas produzidas para a confecção dos concretos. A influência das cinzas selecionadas nos índices físicos e na resistência à compressão dos concretos (após 3, 7, 28 e 180 dias) também é apresentada;

Capítulo 6: Conclusão da dissertação, onde os resultados mais relevantes são apresentados, assim como as sugestões para trabalhos futuros;

Capítulo 7: Trata das referências bibliográficas da pesquisa;

Por fim, em anexo estão apresentados o método de dosagem e o programa de dosagem adotado. O Anexo A explica o método de dosagem adotado na pesquisa: Método de Empacotamento Compressível (MEC), desenvolvido por De Larrard (1999), uma teoria baseada num modelo de empacotamento de partículas para a otimização de misturas granulares objetivando a máxima compacidade possível. O Anexo B apresenta a dosagem do concreto de referência utilizando o programa computacional Betonlab Pro2<sup>®</sup> desenvolvido no LCPC, a partir do Modelo de Empacotamento Compressível.

## 2. Revisão Bibliográfica

Neste item serão abordados aspectos importantes sobre o emprego de aditivos minerais em argamassas e concretos, principalmente associados à cinza do bagaço de cana-de-açúcar, que é o principal material utilizado nesta pesquisa.

### 2.1. Aditivos minerais

O termo aditivo mineral pode ser classificado, segundo Malhotra e Mehta (1996), como um material pozolânico ou cimentício utilizado como constituinte do concreto. De acordo com Cordeiro (2006), os aditivos minerais quando utilizados em substituição a uma parcela de clínquer podem proporcionar uma redução dos custos de produção e dos impactos ambientais, já que são normalmente obtidos a partir de resíduos industriais ou agroindustriais. Sendo assim, o emprego de cinzas do bagaço de cana-de-açúcar possibilita o uso adequado de um resíduo, a preservação das jazidas de calcário e argila e uma menor geração dos gases liberados durante a fabricação do cimento Portland.

A inclusão de aditivos minerais ao concreto em substituição ao cimento acarreta vantagens como, por exemplo, melhoria da trabalhabilidade, durabilidade à fissuração térmica e à ataques químicos e aumento da resistência mecânica (MEHTA *et al.*, 1994). Essas mudanças nas propriedades dos materiais cimentícios produzidos com aditivos minerais podem ser ocasionadas por efeitos químicos e físicos (CORDEIRO, 2006). Os efeitos químicos são resultados das reações pozolânicas (item 2.1.1.1) e os efeitos físicos são classificados como: diluição do cimento Portland, efeito fíler e nucleação heterogênea.

A diluição ocorre quando há a substituição de uma quantidade de cimento por um aditivo mineral, aumentando a relação água/cimento (LAWRENCE *et al.*, 2003). Esse efeito pode ocorrer de duas formas

distintas. A primeira consiste na substituição de uma parcela do cimento pelo aditivo e a segunda seria apenas acrescentar o aditivo mineral. Ambas as formas geram uma diluição do cimento Portland na mistura. A inclusão de partículas finas e ultrafinas do aditivo mineral gera à mistura uma maior compacidade. Denomina-se essa ação de efeito fíler.

A Figura 2.1 ilustra o efeito fíler em uma pasta com cimento Portland, água, aditivo mineral fino e um aditivo químico superplastificante. Na Figura 2.1-a, tem-se cimento e água formando uma pasta, em que, devido às forças atrativas de origens eletrostáticas as partículas se encontram aglomeradas formando grandes vazios capilares, o que reduz a probabilidade de partículas de cimentos serem totalmente hidratadas. Acrescentando-se a mistura um aditivo superplastificante há uma dispersão das partículas de cimento, contribuindo para uma hidratação completa (Figura 2.1-b). Na Figura 2.1-c, pode-se observar que a incorporação do aditivo mineral promove o preenchimento dos vazios entre as partículas de cimento, promovendo assim, uma maior compacidade a mistura (CORDEIRO, 2006).

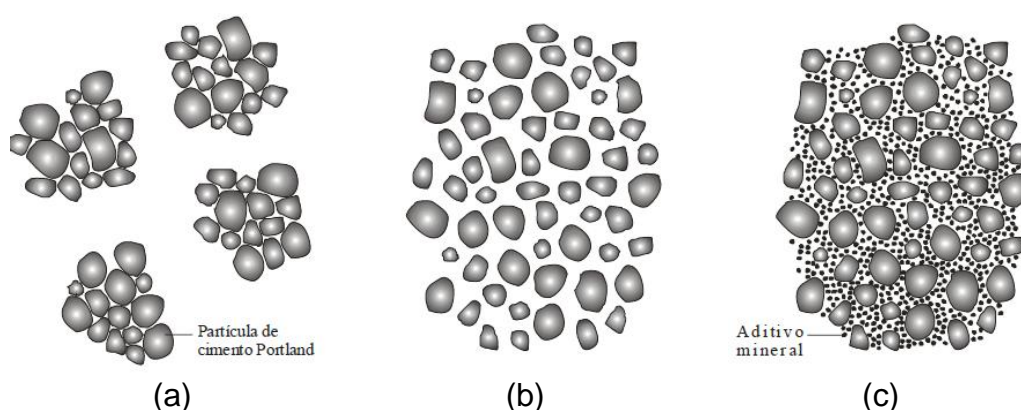


Figura 2.1 - Representação esquemática de partículas de cimento Portland, (a) sem aditivos, (b) com aditivos superplastificante, (c) adicionando aditivo mineral fino (CORDEIRO, 2006).

O terceiro efeito físico gerado pela incorporação de aditivo mineral é a nucleação heterogênea. Quando partículas muito finas são acrescentadas ao cimento Portland há uma facilidade destas se alojarem

nos interstícios dos cristais de clínquer. Isso gera um aumento na superfície efetiva de contato, acelerando as reações de hidratação dos compostos (CORDEIRO, 2006).

### 2.1.1. Pozolanas

O termo pozolana, segundo a norma NBR 12653 (1992), são materiais silicosos ou silico-aluminosos, que quando moídos e misturados com água reagem com o hidróxido de cálcio formando compostos com propriedades de se aglomerar. Porém, sem a adição de água esses materiais possuem pouca ou nenhuma propriedade aglomerante.

Registros históricos comprovam que pozolanas misturadas com água e cal já eram usadas a cerca de 2000 anos atrás pelos romanos em construções que continuam praticamente intactas até os dias atuais (MASSAZZA, 1998). Como exemplos, destacam-se o Coliseu (80 a 70 a.C.) e o Pantheon (118 a 126 d.C.), ambos em Roma. Para a construção do Coliseu (Figura 2.2-a) foi utilizado como pozolana um composto aglomerante de Pozzuoli, da ilha grega de Santorim (KLEMM, 1989) e cinzas vulcânicas nas paredes de concreto do Pantheon (Figura 2.2-b) (BLEZARD, 1998).



(a)



(b)

Figura 2.2-Construções antigas com pozolanas: (a) Coliseu e (b) Pantheon.  
(Fonte: www.wikipedia.org.br).

Na atualidade, as maiores e mais importantes construções civis no mundo utilizam em sua constituição a pozolana. Um importante exemplo de construção, a Usina Hidrelétrica de Itaipu (Figura 2.3), onde a cinza volante foi utilizada.



(a) (b)  
Figura 2.3 - Usina Hidrelétrica de Itaipu, (a) vista frontal, (b) vista lateral.  
(Fonte: Itaipu, 2010).

De acordo com Mehta *et al.* (1994), os subprodutos estão se tornando rapidamente uma fonte de aditivos minerais e se as propriedades do material pozolânico são tais que ele possa ser usado como substituto parcial do cimento Portland no concreto, isso resulta em vantagens econômicas e diminuição da emissão de gases poluentes para a atmosfera.

#### 2.1.1.1. Reações pozolânicas

As reações de hidratação do cimento Portland, que são reações químicas entre os silicatos e aluminatos com água, ocorrem quase que instantaneamente à medida que se adiciona água ao cimento (NEVILLE, 1997). Os principais constituintes do cimento são: silicato tricálcico ( $C_3S$ ), silicato dicálcico ( $C_2S$ ), aluminato tricálcico ( $C_3A$ ) e ferroaluminato



tetracálcico (C<sub>4</sub>AF). O C<sub>3</sub>S, responsável pela resistência inicial e pelo aumento da resistência final da pasta, apresenta uma rápida hidratação e desprende uma quantidade média de calor, comparado as outras fases. O C<sub>2</sub>S, por sua vez, é responsável pelo aumento da resistência nas idades avançadas, apresenta uma lenta hidratação e desprende uma quantidade pequena de calor. A hidratação dos dois compostos produz silicato de cálcio hidratado (C-S-H) e hidróxido de cálcio (CH). As reações e os valores de entalpia estão descritos nas Equações 1 e 2.



Quando materiais pozolânicos são acrescentados à mistura, durante a hidratação do cimento, a sílica (SiO<sub>2</sub>) e/ou alumina (Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) amorfas, presentes nestes materiais, reagem com o hidróxido de cálcio (CH), liberado na hidratação do cimento, formando C-S-H e C-A-H, de acordo com a Equação 3.



De forma simplificada, a reação do hidróxido de cálcio com a pozolana pode variar segundo fatores como: conteúdo da pozolana, teor de SiO<sub>2</sub> ativa na mistura, natureza das fases ativas da pozolana, taxa de reação, área superficial da pozolana, relação de sólidos por água e temperatura da mistura (CORDEIRO, 2006).

Dentre os materiais pozolânicos, encontram-se: sílica ativa, argilas calcinadas, cinza da casca do arroz, cinza volante, cinzas vulcânicas e cinzas do bagaço da cana-de-açúcar. A seguir serão apresentados

detalhes acerca da cinza do bagaço, que foi a pozolana utilizada na pesquisa.

## 2.2. Cinzas do bagaço da cana-de-açúcar

### 2.2.1. Definição e histórico da cana-de-açúcar

Segundo a definição biológica, a cana-de-açúcar é uma espécie alógama, da família Gramíneae (Poaceae) tribo Andropogoneae, gênero *Saccharum* e dentro deste gênero existem seis espécies: *S. officinarum* L., *S. robustum* Brandes e Jeswiet, *S. barberi* J., *S. sinensis* Roxb., *S. spontaneum* L., e *S. edule* Hask (Daniels e Roach, 1987).

A cana-de-açúcar é uma planta típica de climas tropicais e subtropicais, que proporciona inicialmente a germinação e o desenvolvimento vegetativo para em seguida promover a maturação e acúmulo de sacarose nos colmos. O plantio se adapta com facilidade a diferentes tipos de solo, porém solos com camadas permeáveis superficiais ou mal drenados não são indicados para o cultivo (COPERSUCAR, 2011). A importância da cana-de-açúcar pode ser atribuída à sua múltipla utilização, podendo ser empregada in natura, sob a forma de forragem, para alimentação animal ou como matéria prima para a fabricação de rapadura, melado, aguardente, açúcar e álcool. Além disso, gera direta e indiretamente milhares de empregos por ano no país (COELHO *et al.*, 2008). A Figura 2.4 ilustra uma plantação de cana-de-açúcar.



(a) (b)  
Figura 2.4 – Vista geral (a) e detalhe (b) de uma plantação de cana-de-açúcar. (Fonte: [www.wikipedia.org.br](http://www.wikipedia.org.br)).

A cana-de-açúcar é um dos produtos agrícolas mais importantes e tradicionais do Brasil, e isso remota o período colonial. Em 1500, com a chegada dos portugueses ao Brasil, iniciou-se a exploração do Pau-Brasil na Mata Atlântica, produto de grande valor no mercado europeu. Durante trinta anos, o Brasil foi atacado por holandeses, ingleses e franceses que tinham ficado fora do Tratado de Tordesilhas (acordo entre Portugal e Espanha que dividiu as terras recém descobertas em 1494). O receio da coroa portuguesa em perder o território brasileiro para outro país era grande, que em 1530, o rei de Portugal organizou a primeira expedição comandada por Martin Afonso de Souza e tinha por objetivos: povoar o território brasileiro, expulsar os invasores e iniciar o cultivo de cana-de-açúcar (MOTA e BRAICK, 1999).

Vários motivos levaram a escolha da cana-de-açúcar, como por exemplo, solo propício para o plantio, mão-de-obra escrava e por ser um produto muito bem cotado no mercado europeu. A ausência de ouro e metais preciosos fez com que o açúcar se tornasse o principal produto da economia colonial e de exportação do país até a metade do século XVIII. Nessa época, a Holanda se supera na construção de uma indústria açucareira e no abastecimento do mercado europeu o que faz com que o Brasil perca o monopólio do açúcar, desvirtuando o quadro político-econômico vigente na ocasião. Neste período, inicia-se a descoberta das primeiras minas de ouro, uma nova fonte de renda para o país. (MOTA e BRAICK, 1999).

Nas primeiras décadas do século XX o álcool etílico passou a ser usado como combustível no Brasil. Porém, a expansão do uso do álcool anidro adicionado à gasolina aconteceu, apenas, com a criação do Programa Nacional do Álcool pelo Governo Federal (PROÁLCOOL), em 1975, com o intuito de diminuir a importação do petróleo (MOREIRA e GOLDEMBERG, 1999). A crise mundial de 1979 deu início a segunda etapa do PROÁLCOOL, com objetivo de produzir álcool hidratado para ser utilizado como substituto da gasolina. O novo combustível foi tão satisfatório que em 1985 cerca de 96% dos automóveis apresentavam motores a álcool hidratado, aumentando assim, as escalas de produção e moagem da cana-de-açúcar no país (WAACK e NEVES, 1998).

A partir de 1990 a produção de automóveis a álcool reduziu atingindo níveis irrelevantes em 1996. Entre as razões apontadas para justificar a queda encontra-se o aumento da relação entre os preços do álcool e da gasolina; eliminação das vantagens tributárias para os automóveis com motor a álcool em comparação com os veículos movidos a gasolina e a necessidade de importação de etanol/metanol para regular as incertezas (MOREIRA e GOLDEMBERG, 1999).

Em 2003, a indústria automotiva nacional lançou o motor flexível bicombustível, que opera com gasolina e/ou álcool. Esta nova tecnologia, segundo o IBGE (2011), é a grande responsável pelo aumento da demanda por etanol. Isto pode ser constatado na Figura 2.5, que mostra a evolução da quantidade e o combustível dos automóveis vendidos no Brasil, desde 1980 até 2009, onde é possível observar que o motor bicombustível já ocupa o maior espaço no mercado nacional.

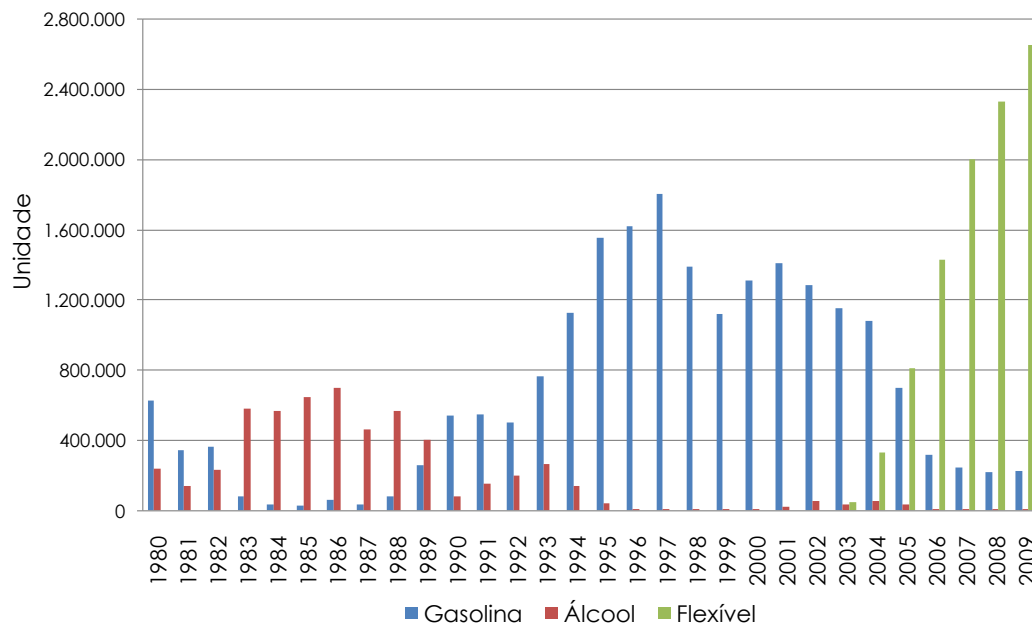


Figura 2.5 - Venda de automóveis e comerciais leves por tipo de combustível (IBGE, 2011).

Segundo dados da ÚNICA (2011), o cultivo de cana-de-açúcar ocupa cerca de 7 milhões de hectares ou cerca de 2% de toda a terra arável do Brasil, que é o maior produtor mundial, seguido pela Índia, Tailândia e Austrália. Há cultivo em todas as regiões brasileiras, com destaque para as regiões Sudeste, Centro-Oeste, Sul e Nordeste. A Figura 2.6 ilustra as áreas onde se concentram as plantações e usinas produtoras de açúcar, etanol e bioeletricidade.

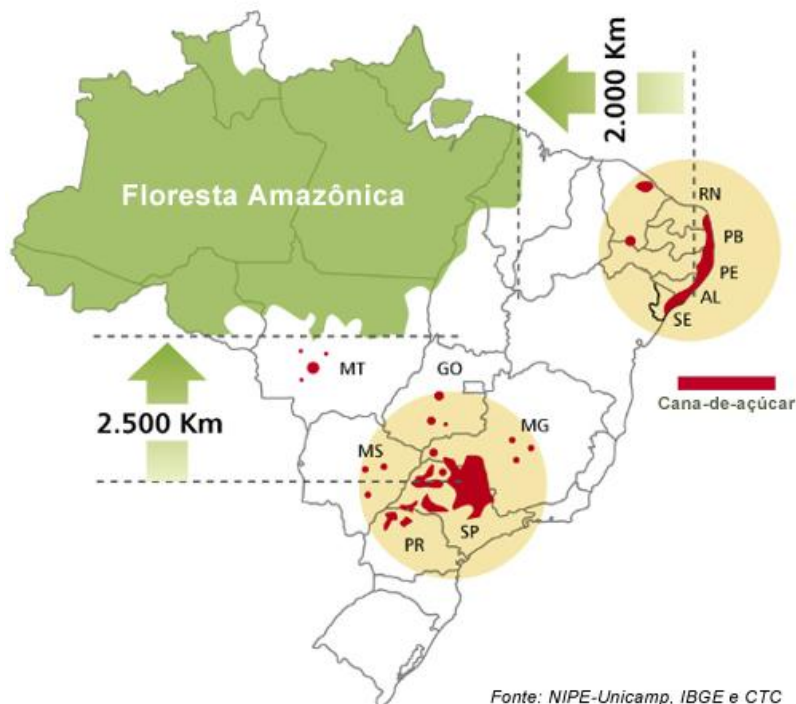


Figura 2.6 – Áreas de concentração de cana-de-açúcar no Brasil (Fonte: IBGE, 2011).

De acordo com o IBGE (2011), houve um aumento na produção dos derivados da cana-de-açúcar no ano de 2010 de 15,7%, o que é justificado pelo acréscimo tanto na produção de açúcar (20,1%), como na de álcool (11,9%), reflexos dos novos projetos que estão sendo implantados no país para atender a demanda de álcool. Além disso, a produtividade vem crescendo nos últimos anos com a introdução de novas variedades e novas tecnologias.

A Figura 2.7 ilustra o crescimento das safras de cana-de-açúcar nas regiões do país, onde é possível observar que o crescimento da região Sudeste é constante e significativo com relação às demais regiões. Dentro da região Sudeste, o estado que mais produz é São Paulo (cerca de 346 milhões de toneladas entre 2008/2009), seguido de Minas Gerais (42,5 milhões de toneladas no mesmo período), de acordo com os dados do IBGE (2011).

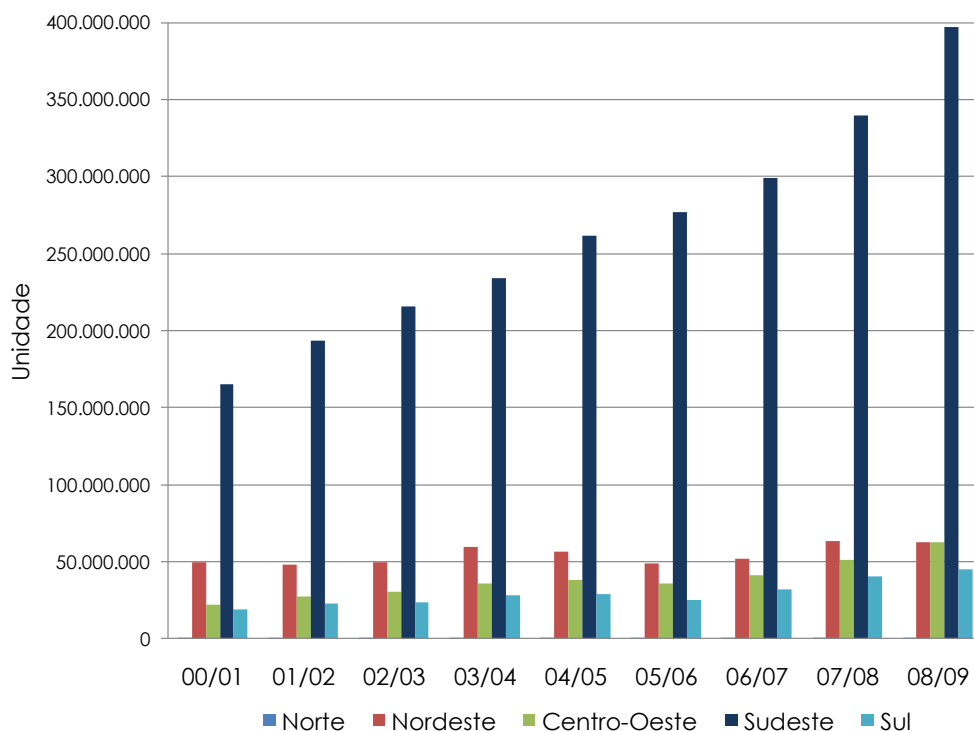


Figura 2.7 - O processamento da cana-de-açúcar no Brasil (Fonte: IBGE, 2011).

Essa grande produção de açúcar e álcool gera como subprodutos resíduos que na maioria das vezes já tem um destino pré-fixado. A Tabela 2.1 ilustra os principais resíduos gerados na indústria da cana-de-açúcar, sua origem e destino. O resíduo estudado na pesquisa é a cinza do bagaço da cana-de-açúcar (CBCA).

Tabela 2.1 – Resíduos gerados pela cana-de-açúcar (HEMERLY, 1999).

Resíduo	Origem	Destino
Bagaço	Moagem da cana e extração do caldo	Co-geração de energia elétrica, uso como adubo, produção de ração animal, aglomerados e celulose
Torta de filtração	Filtração do lodo gerado na clarificação	Uso como condicionador do solo e produção da ração animal
Vinhoto	Resíduo da destilação do melaço fermentado (para obtenção do álcool)	Uso como fertilizante
Melaço	Fabricação do açúcar	Praticamente todo usado na fabricação do álcool
Ponta de cana	Corte da cana para moagem	
CBCA	Queima do bagaço para co-geração de energia	Adubação do solo

### 2.2.2. Bagaço da cana-de-açúcar

O bagaço da cana-de-açúcar é o maior resíduo da agroindústria brasileira. Para cada tonelada de cana-de-açúcar, 260 kg de bagaço são gerados com 50% de umidade (CORTEZ *et al.*, 1992). Estima-se que, a cada ano, sobrem de 5 a 12 milhões de toneladas deste material, que corresponde a aproximadamente 30% da cana moída. As próprias usinas utilizam de 60 a 90% deste bagaço como fonte energética, substituindo o óleo combustível no processo de aquecimento das caldeiras e para a geração de energia elétrica (FAPESP, 2008).

Após a colheita a planta é levada até a usina onde passa por três moendas e o produto da primeira vai para a produção de açúcar. Na segunda e na terceira moagens o que é produzido é o álcool combustível. O resíduo gerado é o bagaço, que é levado por uma esteira (Figura 2.8) e usado como combustível para alimentar as caldeiras que produzem vapor para a geração de eletricidade, um processo de co-geração de energia (SALES *et al.*, 2010). Esse processo de geração de energia elétrica é



totalmente automatizado e inserido na linha de produção das usinas, criando-se assim uma terceira fonte de renda bastante significativa para os produtores de açúcar e álcool. O produto final desta queima é uma cinza residual, que varia de acordo com as condições de queima e umidade do bagaço, que é normalmente utilizado como fertilizante nas plantações de cana (SALES *et al.*, 2010), apesar de possuir poucos nutrientes para o solo (CORDEIRO, 2006).



Figura 2.8 – Bagaço da cana-de-açúcar na esteira da usina Coagro em Campos dos Goytacazes/RJ.

Com o objetivo de diminuir problemas associados à gestão de resíduos e à emissão de gases poluentes a atmosfera, aliado à composição química adequada da cinza do bagaço, estudos vêm comprovando vantagens nas propriedades dos materiais cimentícios utilizando a cinza como aditivo mineral.

### 2.3. Aplicação das cinzas do bagaço da cana-de-açúcar em argamassas e concretos

O principal composto químico proveniente da cinza do bagaço é a sílica, que geralmente apresenta uma quantidade, em massa, acima de 60%

(CORDEIRO, 2006). A composição química da cinza, estudada por diversos autores, evidencia a grande quantidade de sílica: 72,7% (HERNÁNDEZ *et al.*, 1998), 63,2% (SINGH *et al.*, 2000), 64,5% (GANESAN *et al.*, 2007), 69,7% (FREITAS, 2005), 89,4% (MANSANEIRA, 2010).

O emprego deste material como pozolana é possível mantendo essa sílica em estado amorfo, dependendo das condições de queima empregadas. O emprego deste material em substituição parcial ao cimento Portland, além de trazer vantagens técnicas e ambientais ao produto gerado, agrega valor econômico ao resíduo agroindustrial (CORDEIRO *et al.*, 2009). Entretanto, a distribuição granulométrica variável da cinza, (característica de um sistema de obtenção sem qualquer classificação) gera a necessidade de uma moagem para homogeneizar o material e aumentar a superfície específica, e conseqüentemente, a atividade pozolânica, das partículas (CORDEIRO *et al.*, 2008).

Apesar do histórico de cana-de-açúcar na região Norte Fluminense, estudos da incorporação da cinza do bagaço como aditivo mineral ainda são iniciais. Freitas (2005) estudou cinzas do bagaço coletadas das caldeiras de duas usinas da região; Coagro e Paraíso, por meio de ensaios de índice de atividade pozolânica e análises de difração de raios X. Os resultados dos ensaios iniciais mostraram as cinzas *in natura* com pouca pozolanicidade e com presença de material cristalino. Com isso, a autora optou por um estudo de tempo (4, 5 e 6 h) e temperatura (500, 600 e 700°C) de calcinação. A partir dos ensaios, selecionou-se a CBCA Coagro calcinada a 600°C por 5 h para passar pelo estudo de moagem (30 min, 1, 2, 3 e 4 h) com o objetivo de tornar a cinza mais reativa. A Figura 2.9 mostra o gráfico com os resultados de ensaios de índice de atividade pozolânica, onde se observa a diferença de pozolanicidade das cinzas *in natura* e tratadas em laboratório. Apesar do melhor tempo de moagem ter sido 3 h (107%), a autora selecionou o tempo de 1 h (102%) para a realização dos ensaios mecânicos com argamassas com diferentes teores de substituição de cimento pela cinza, por conta da pequena variação e do menor gasto de energia.

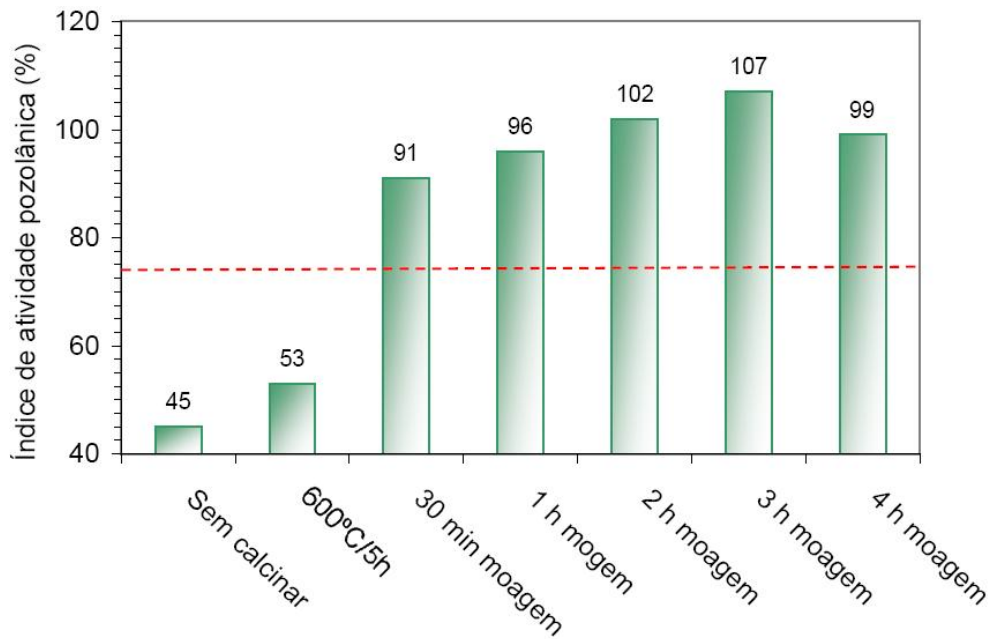


Figura 2.9 – Valores de índice de atividade pozolânica com cimento Portland de CBCA (FREITAS, 2005).

Cordeiro (2006) desenvolveu uma pesquisa com o objetivo de analisar a viabilidade da utilização da cinza residual ultrafinas do bagaço da cana-de-açúcar como aditivo mineral em concretos de resistência convencional e de alto desempenho. Foram produzidos cinzas em processos de queima e moagem controladas, em que foram selecionadas duas, com base na atividade pozolânica e no consumo de energia. Sendo assim, comparou-se as propriedades reológicas e mecânicas entre concretos de cimento Portland e as cinzas, com teores de substituição do cimento de 0, 10, 15 e 20%. Entre as conclusões, pode-se constatar que a cinza ultrafina do bagaço proporcionou redução na absorção por capilaridade e na penetração acelerada de íons cloreto devido à atividade pozolânica e o refinamento de poros proporcionados pela cinza.

Ganesan *et al.* (2007) estudaram a cinza do bagaço da cana-de-açúcar como substituta do cimento Portland sobre as propriedades físicas e mecânicas do concreto endurecido. Os ensaios realizados foram: resistência à tração e à compressão, absorção de água, permeabilidade e resistência à penetração de íons cloreto. Entre as conclusões destacaram-

se que 20% foi o teor ótimo de substituição de cimento pela cinza do bagaço da cana-de-açúcar.

Cordeiro *et al.* (2008) investigaram os efeitos físicos e químicos de uma cinza residual do bagaço de cana-de-açúcar nas propriedades de argamassas. Inicialmente foi analisada a influência do tamanho das partículas da CBCA na resistência à compressão, grau de empacotamento das partículas, índice de atividade pozolânica e o teste de Chapelle modificado. Posteriormente, foram comparados os desempenhos de argamassas contendo CBCA e quartzo moído, um material insolúvel, de baixa reatividade e mesmo teor de empacotamento. Entre os resultados, destaca-se que a cinza com maior finura apresentou o maior grau de empacotamento, gerando uma argamassa com maior resistência à compressão e atividade pozolânica. Além disso, no teste de atividade pozolânica, a resistência à compressão da argamassa com CBCA foi 31% maior que a resistência da argamassa com quartzo moído. Os resultados sugeriram que a CBCA apresenta propriedades físico químicas adequadas para a sua utilização com aditivo mineral e sua reatividade depende do tamanho e finura das partículas.

Cordeiro *et al.* (2009a) investigaram o papel do tipo de moinho e circuito de moagem em laboratórios, área superficial e atividade pozolânica de CBCA. Entre os resultados encontrados, destaca-se que a granulometria de valores de  $D_{80}$  abaixo de 60  $\mu\text{m}$  e áreas de superfície específica de Blaine acima de 300  $\text{m}^2/\text{kg}$  resultaram em produtos que podem ser classificados como pozolânicos independentemente do tipo e configurações de moagem. Além disso, a substituição parcial de cinzas ultrafinas por cimento (10, 15 e 20% em massa) em um concreto de alto desempenho não alterou de forma mensurável o comportamento mecânico, mas melhorou a reologia e a resistência à penetração de íons cloreto.

Cordeiro *et al.* (2009b) estudaram o processo de queima e caracterização de cinzas do bagaço da cana-de-açúcar com alta reatividade. No estudo foram testadas, em forno tipo Mufla, diferentes temperaturas de calcinação com o objetivo de obter uma cinza com sílica

amorfa e baixo teor de carbono. Entre as conclusões destaca-se que a cinza calcinada, em forno mufla, à temperatura de 600°C durante 3 horas, após um patamar de 3 horas a 350°C (taxa de aquecimento 10°C/min) apresentou-se favorável em relação à presença de sílica amorfa, baixo teor de carbono e elevada área de superfície específica.

Morales *et al.* (2009) estudaram a influência das condições de queimas (a temperatura de 800 e 1000°C) de cinzas ultrafinas do bagaço de cana sobre as suas características microestruturais. Entre os resultados destacam-se a alta atividade pozolânica apresentada pelas cinzas calcinadas e a influência da calcinação na composição química e na morfologia das cinzas.

Chusilp *et al.* (2009) pesquisaram sobre as propriedades físicas do concreto contendo cinza do bagaço de uma fábrica de açúcar, incluindo a resistência a compressão, permeabilidade a água e liberação de calor. As cinzas foram usadas como substitutas do cimento em proporções de 10, 20 e 30%. Concluiu-se que a cinza do bagaço é um material adequado para uso como pozolana na confecção de concretos, de acordo com os seguintes resultados:

- A elevação da temperatura foi menor para o concreto com 30% de substituição e menor para o de 10% de substituição (comparando apenas os concretos com cinzas). Percebe-se assim, que quanto maior a proporção de cinza menor a liberação de calor.
- A fração ideal de substituição de cimento por cinza é de 20%, onde o concreto apresentou a maior resistência à compressão aos 28 e 90 dias, uma baixa permeabilidade e liberação de calor, se comparado ao concreto de referência.

Mansaneira (2010) estudou duas cinzas do bagaço da cana-de-açúcar de uma usina na cidade de Astorga (PR) para verificar sua potencialidade em substituição ao cimento Portland. A primeira cinza (C1) foi extraída diretamente da fornalha e a segunda (C2) foi extraída do sistema de lavador de gases. Ensaios de caracterização química e mineralógica da

CBCA foram realizados. As cinzas foram calcinadas, em forno mufla, com tempos de 2, 4 e 6 h e temperaturas de 600, 800 e 1000°C, com taxa de aquecimento de 10°C/min. A partir dos resultados dos ensaios de difração de raios, espectroscopia por infravermelho e índice de atividade pozolânica, o autor selecionou a cinza C26H600 (cinza 2, calcinada a temperatura de 600°C durante 6 h) para o estudo de moagem por 1 e 2 h. O ensaio de superfície específica mostrou pouca variação dos resultados das cinzas C1 (1,55 m<sup>2</sup>/g) e C2 (1,65 m<sup>2</sup>/g). Porém para a cinza selecionada o tempo de moagem a alteração foi expressiva: C26H600-1M (moída 1 h) apresentou superfície específica de 3,52 m<sup>2</sup>/g, enquanto que a mesma cinza moída por 2 h resultou em 5,67 m<sup>2</sup>/g, conduzindo ao aumento da superfície de reação. Ensaios de índice de atividade pozolânica (NBR 5752, 1992) e de resistência mecânica foram realizados com teores de substituição de 10, 20 e 30%. Entre os resultados encontrados pelo autor, destaca-se que a substituição de 20% de cimento pela cinza 2, calcinada a temperatura de 600°C durante 6 h e moída a 1 h apresentou uma resistência mecânica 6% maior quando comparado a referência.

Sales *et al.* (2010) coletaram cinzas do bagaço em 4 diferentes usinas no interior de São Paulo. As cinzas foram devidamente caracterizadas, onde ficou constatado que estas apresentavam baixa perda ao fogo (6%) e alto percentual de sílica (mais de 75%), granulometria fina e uma estrutura cristalina. Sendo assim, as cinzas foram utilizadas em substituição parcial de areia em argamassas (porcentagens de substituição de 0, 10, 15, 20, 30, 50 e 100%) e concretos (substituição de 0, 30 e 50%), onde ensaios de resistência à compressão, a tração e cálculo do módulo de elasticidade foram realizados. Entre os resultados destacou-se que a substituição de areia por cinza acarretou uma melhora na resistência mecânica das misturas.

Padua *et al.* (2011) estudarem as características físico-químicas de quatro diferentes tipos de cinzas do bagaço obtidas em uma destilaria da cidade de Cláudio/MG. As cinzas passaram por diferentes processos de queimas controladas e foram caracterizadas através dos ensaios de difração de raios X, espectrometria de fluorescência, atividade pozolânica e

microscopia eletrônica de varredura. Entre os resultados é possível observar que as cinzas produzidas em laboratório (passando por queimas e moagens controladas) são mais recomendadas para o uso parcial em concretos e argamassas duráveis e de menor impacto ambiental.

### 3. Materiais

A escolha dos materiais constituintes para a presente pesquisa foi feita de acordo com a disponibilidade da região Norte Fluminense, mais precisamente do Município de Campos dos Goytacazes, levando em consideração, em alguns casos, as especificidades de cada ensaio.

Para a confecção das argamassas e concretos foram utilizados: cimento Portland, agregados, aditivo superplastificante e cinza do bagaço de cana-de-açúcar. Serão apresentadas a seguir, a descrição e a caracterização destes materiais.

#### 3.1. Cinzas do bagaço da cana-de-açúcar

Nesta pesquisa foram utilizados dois tipos de cinzas residuais do bagaço de cana-de-açúcar, que foram coletadas na Usina Coagro. A Usina, ilustrada na Figura 3.2, está localizada no Distrito de Goytacazes, Município de Campos dos Goytacazes/RJ. O tipo de caldeira utilizada na Coagro é a de água tubular de 1.800 m<sup>2</sup> de superfície, com temperaturas de operação entre 900 e 1.100°C. Por safra são queimadas na caldeira da Coagro aproximadamente 186.000 toneladas de biomassa (quase que exclusivamente bagaço).





Figura 3.1- Usina Coagro, localizada no Município de Campos dos Goytacazes/RJ.

A primeira cinza utilizada no trabalho é uma cinza volante (denominada CBCA1-*in natura*) resultante da má combustão na caldeira, que pode ser ocasionada por fatores como entrada de alta umidade, impurezas e tamanho do bagaço. Essa cinza é coletada por meio de retentores de fuligem via úmida, como o que é apresentado na Figura 3.2-a.

A segunda cinza estudada (denominada CBCA2 -*in natura*) é resultado da queima do bagaço na caldeira, sendo retirada periodicamente a cada quinze dias pela parte inferior da caldeira, conforme ilustra a Figura 3.2-b. Assim como a CBCA1-*in natura*, a CBCA2-*in natura* apresenta coloração preta indicativa da presença de grande quantidade de carbono residual.



(a)



(b)

Figura 3.2- Locais de coleta das cinzas na usina Coagro: (a) retentor de fuligem – CBCA1-*in natura*, (b) parte inferior da caldeira - CBCA 2-*in natura*.

Após a coleta, as cinzas foram secas em estufa no laboratório a 80°C por 48 horas, antes da homogeneização e quarteamento. A composição química das cinzas *in natura* foi feita por análises semi-quantitativa em espectrômetro de fluorescência de raios X (LECIV/UENF) e está indicada na Tabela 3.4. Observa-se que a CBCA 1-*in natura* apresenta um elevado valor de perda ao fogo, que é indicativo da presença de carbono residual, e uma pequena quantidade de sílica ( $SiO_2$ ), enquanto que a cinza CBCA 2-*in natura* uma quantidade maior de sílica e menor de carbono.

Freitas (2005) fez uma análise prévia de uma cinza do bagaço coletada na caldeira da Coagro, onde a composição química do material é similar a CBCA2-*in natura*, com percentuais de  $SiO_2$  e  $Al_2O_3$  iguais 65,7 e 13,8%, respectivamente.

Tabela 3.1- Composição química (percentual em massa) das cinzas do bagaço in natura.

<b>Composto</b>	<b>CBCA 1 – <i>in natura</i></b>	<b>CBCA 2 – <i>in natura</i></b>
SiO <sub>2</sub>	10,18	53,17
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	1,19	13,92
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,92	4,44
CaO	1,57	1,48
K <sub>2</sub> O	1,29	2,35
SO <sub>3</sub>	1,36	1,63
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	1,00	1,25
TiO <sub>2</sub>	0,12	0,76
MnO	0,11	0,08
Perda ao fogo	82,24	20,92

## 3.2. Cimento Portland

Foram empregados dois tipos de cimento Portland: CPP classe G e CPV ARI. O cimento Portland CPP Classe G (NBR 9831, 1993) foi usado para a confecção das argamassas e o cimento Portland Classe V ARI (NBR 5737, 1992), por ser o cimento comercializado na região com menor teor de adição mineral, para a confecção dos concretos.

### 3.2.1. Cimento Portland CPP Classe G

Tendo em vista os estudos de índice de atividade pozolânica com cimento Portland (NBR 5752, 1992) e de resistência à compressão de argamassas com variados teores de substituição de cimento por cinzas agroindustriais, optou-se por um cimento sem adições minerais, possibilitando, assim, uma precisão maior na caracterização da reatividade das cinzas.

A composição química do cimento CPP, feita por análise semi-quantitativa em espectômetro de fluorescência de raios X do LECIV/UENF, pode ser vista na Tabela 3.1. A perda ao fogo foi determinada de acordo com a NBR 5743 (1989). Como esperado, o cimento é constituído predominantemente por CaO, SiO<sub>2</sub>, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> e Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>. A compactidade, igual a 0,53, foi determinada por teste de demanda d'água e a massa específica do cimento, seguiu o ensaio de Le Chatelier (NBR NM 23, 2000), igual a 3.170 kg/m<sup>3</sup>.

Tabela 3.2 – Composição química do Cimento Portland CPP – Classe G.

<b>Composto</b>	<b>Composição (%)</b>
SiO <sub>2</sub>	20,85
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	4,23
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	5,25
CaO	63,49
Na <sub>2</sub> O	0,16
K <sub>2</sub> O	0,40
SO <sub>3</sub>	2,38
Perda ao fogo	1,05

Pela curva granulométrica, mostrada na Figura 3.1, é possível observar que o cimento empregado apresenta um tamanho médio de partículas ( $D_{50}$ ) igual a 17  $\mu\text{m}$ .

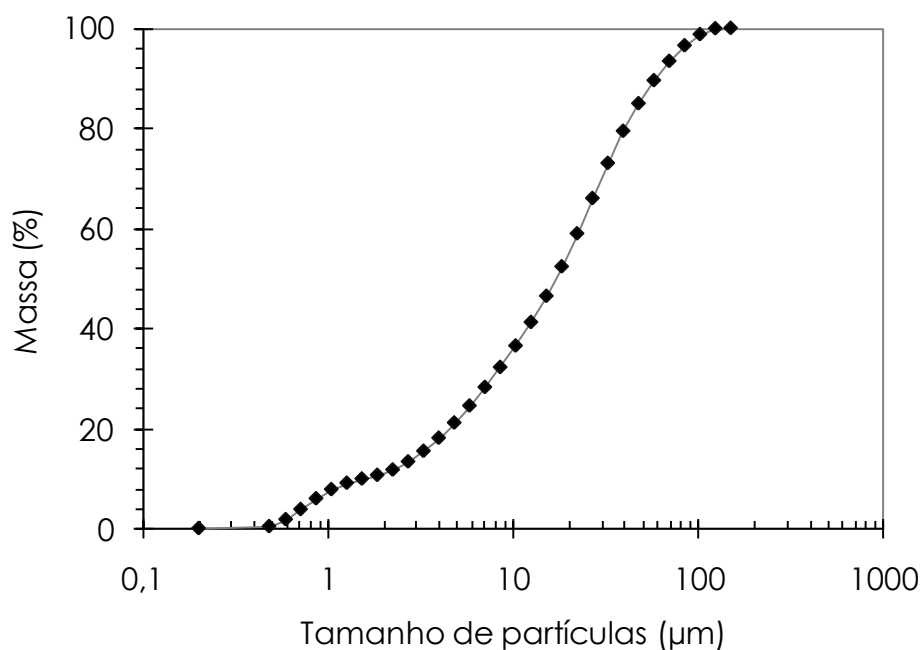


Figura 3.3 – Curva granulométrica do cimento Portland CPP Classe G.

### 3.2.2. Cimento Portland de Alta Resistência Inicial

Um cimento Portland de alta resistência inicial (CP V ARI) LAFARGE® foi selecionado e caracterizado para a confecção dos concretos. A composição química deste cimento foi feita por espectroscopia de fluorescência de raios X do LECIV/UENF, mostrada na Tabela 3.3.

Tabela 3.3 – Composição química do Cimento Portland de alta resistência inicial.

<b>Composto</b>	<b>Composição (%)</b>
SiO <sub>2</sub>	15,50
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	4,50
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	2,30
CaO	71,10
K <sub>2</sub> O	0,60
TiO <sub>2</sub>	0,40
SO <sub>3</sub>	3,40
Perda ao fogo	2,10

As características físicas e mecânicas do CP V ARI estão apresentadas na Tabela 3.3. A compacidade do material foi determinada pelo ensaio de demanda d'água e a massa específica pelo ensaio no frasco de Le Chatelier. Os valores de resistência à compressão, por sua vez, foram obtidos junto ao fabricante. Pela Tabela 3.4 é possível observar a elevada resistência do cimento nas primeiras idades, que é a característica principal do CP V (cerca de 20 MPa após 1 dia)

Tabela 3.4 – Características físicas e mecânicas do cimento Portland de alta resistência inicial.

<b>Característica</b>	<b>Valor</b>
Massa específica	2.960 kg/m <sup>3</sup>
Compacidade	0,52
Resistência à compressão após 1 dia*	20,4 MPa
Resistência à compressão após 3 dias*	31,5 MPa
Resistência à compressão após 7 dias*	38,6 MPa
Resistência à compressão após 28 dias*	47,9 MPa

\*Dados do fabricante.

### 3.3. Agregados

#### 3.3.1. Agregado miúdo

Para a confecção das argamassas para os ensaios de índice de atividade pozolânica com cimento Portland (NBR 5752, 1992) e resistência à compressão utilizou-se areia Normal Brasileira, produzida pelo Instituto de Pesquisas Tecnológicas (IPT/SP) de acordo com a NBR 7214 (1982).

O agregado miúdo selecionado para a produção dos concretos foi uma areia quartzosa média proveniente do Rio Paraíba do Sul, em Campos dos Goytacazes. A granulometria da areia (Figura 3.4) foi determinada

conforme a NBR 7217 (1987). O módulo de finura e dimensão máxima do agregado foram iguais a 1,93 e 2,36 mm, respectivamente.

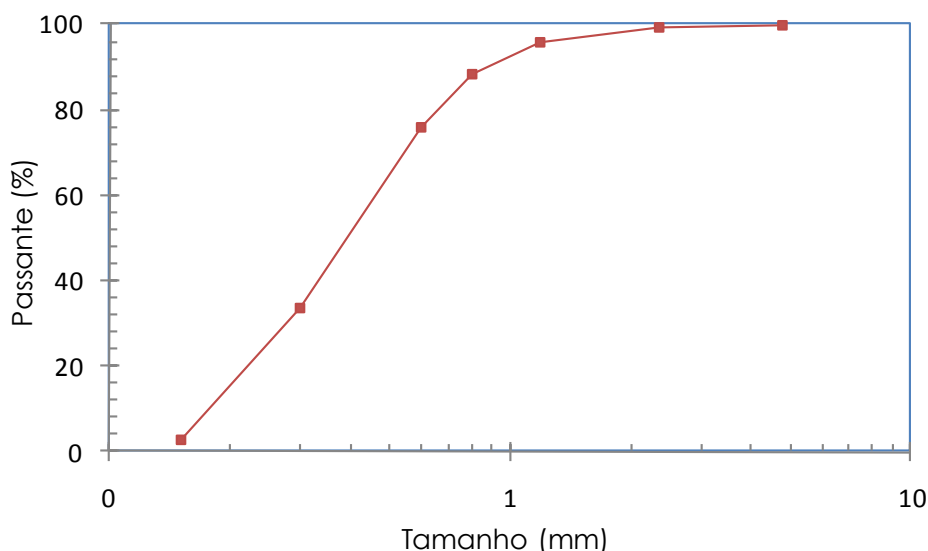
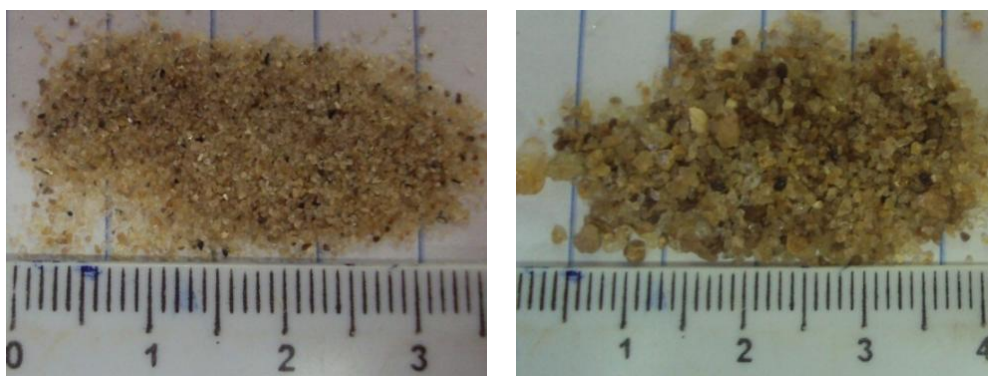


Figura 3.4 - Distribuição granulométrica do agregado miúdo do Rio Paraíba do Sul (Campos dos Goytacazes/RJ).

Na Tabela 3.5 estão representadas as características físicas da areia quartzosa média. A massa específica foi determinada de acordo com a NBR 9776 (1987). O material foi dividido em duas grandes classes para a dosagem dos concretos, onde foi utilizado o Método de Empacotamento Compressível (MEC), proposto por De Larrard (1999). Este modelo visa um melhor arranjo das partículas, como descrito em Anexo 1. A divisão em duas classes foi feita de acordo com a granulometria do material. A Figura 3.5 ilustra as duas classes.

Tabela 3.5 – Características físicas da areia quartzosa média.

Classe	Compacidade
A <sub>1</sub> (< 0,4 mm)	0,5740
A <sub>2</sub> (> 0,4 mm)	0,5980
Massa Específica	2.616 kg/m <sup>3</sup>



(a) (b)  
 Figura 3.5 - Classes da granulometria da areia: (a) classe A<sub>1</sub> < 0,42 mm, (b) classe A<sub>2</sub> > 0,42 mm.

### 3.3.2. Agregado graúdo

O agregado graúdo utilizado na pesquisa foi fornecido pela pedreira Itereré, localizada no Município de Campos dos Goytacazes/RJ. O tipo de rocha na Itereré é o charnoquito, que corresponde a uma rocha com estrutura orientada e textura inequigranular hipidiomórfica, constituída predominantemente por plagioclásio, quartzo e hiperstênio, variando de submilimétricos a centimétricos. A Tabela 3.6 apresenta a composição mineralógica da rocha obtida por análise petrográfica realizada no IPT/SP.

Tabela 3.6 - Composição mineralógica do charnoquito de Campos dos Goytacazes/RJ.

Mineral	Quantidade (% em massa)
Plagioclásio (andesina-oligoclássio)	40-50
Quartzo	15-20
Ortoclásio	15-20
Ortopiroxênio (hiperstênio)	15
Biotita	5
Outros	<5



A Figura 3.6 apresenta a curva granulométrica da brita, que foi determinada de acordo com a NBR 7217 (1987). A brita apresenta módulo de finura de 5,75 e dimensão máxima do agregado igual a 9,5 mm, o que permite classificá-la como brita “0”.

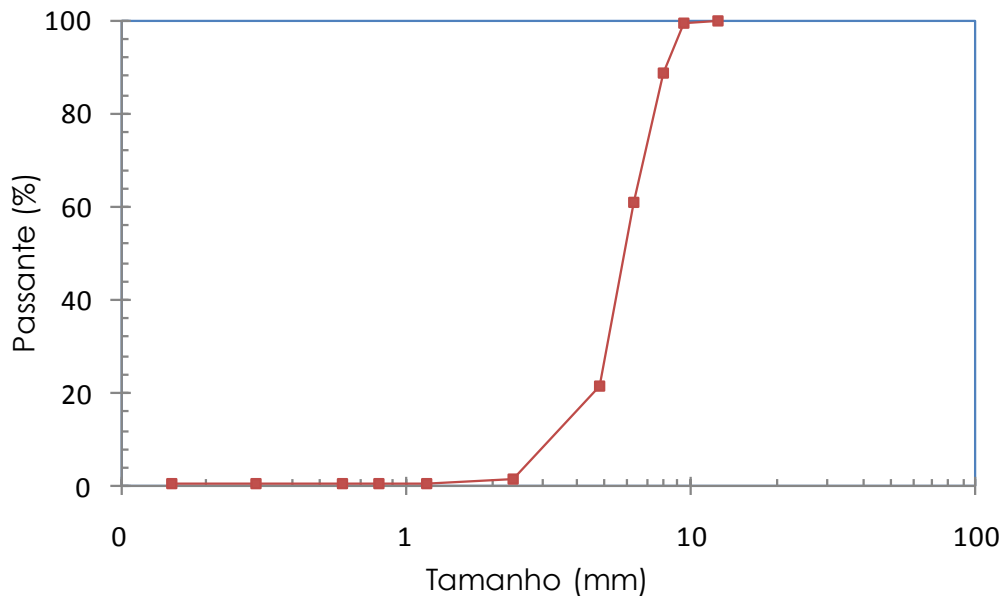


Figura 3.6 - Distribuição granulométrica da brita.

Assim como a areia quartzosa, a brita também foi dividida em duas classes (Figura 3.7), para uma melhor precisão da dosagem com o MEC (Anexo 1).

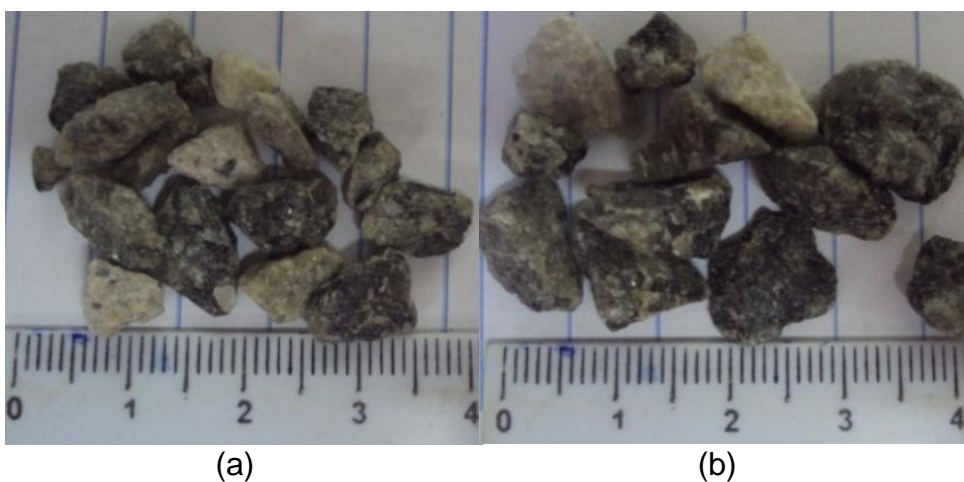


Figura 3.7– Classes de granulometria da brita: (a) classe B1 < 6,3 mm e (b) classe B2 > 6,3 mm.

A Tabela 3.7 apresenta os índices físicos e os parâmetros mecânicos da rocha. O ensaio de absorção de água foi feito de acordo com a NBR 9937 (1987) e possibilitou o cálculo do índice de vazios, massa específica e absorção de água.

Tabela 3.7 – Características físicas e mecânicas do agregado graúdo.

Classe	Compacidade
B <sub>1</sub> (< 0,63 mm)	0,5520
B <sub>2</sub> (> 0,63 mm)	0,5945
Massa Específica	2.616 kg/m <sup>3</sup>
Absorção de água	0,67%
Porosidade aparente	1,77%
Resistência à compressão uniaxial	121,5 MPa*
Resistência à tração na flexão	21,9 MPa*

\*Ensaio realizado no IPT.

### 3.4. Aditivo superplastificante

O aditivo superplastificante utilizado nesta pesquisa para a confecção das argamassas e dos concretos foi um éter carboxílico modificado (Glenium S1) com massa específica de 1210 kg/m<sup>3</sup> e teor de sólidos igual a 32,6% (em massa). O aditivo foi empregado para ajustar as consistências de argamassas e concretos com cinzas do bagaço da cana de açúcar e de referência (sem cinzas).

### 3.5. Água

A água utilizada para a fabricação das argamassas e dos concretos foi proveniente da rede de abastecimento do Município de Campos dos Goytacazes (Águas do Paraíba). Durante a fase de confecção das argamassas a água foi destilada antes do seu emprego.

## 4. Métodos Experimentais

### 4.1. Moagem

As cinzas CBCA1- *in natura* e CBCA2- *in natura* foram moídas no LECIV em moinho de bolas Sonnex (Figura 4.1) com velocidade de 30 rpm e volume da carcaça de aço de 50 litros, sem revestimento. A carga moedora foi composta por 800 esferas de aço de 20 mm de diâmetro, 100 de 25 mm, 225 de 30 mm e 20 de 38 mm. A moagem foi feita em circuito aberto, a seco, com tempos de moagem de 1, 2, 4 e 8 horas, de modo a produzir cinzas com tamanho médio de partículas ( $D_{50}$ ) de aproximadamente 10  $\mu\text{m}$  (cinzas ultrafinas), de acordo com os resultados obtidos por Cordeiro *et al.* (2009a). De acordo com a massa específica aparente das cinzas foram moídas, aproximadamente, 0,95 kg de CBCA1- *in natura* 2 e 2,45 kg de CBCA2- *in natura* por batelada.



Figura 4.1- Moinho de bolas do LECIV (Sonnex).

## 4.2. Calcinação das Cinzas

No intuito de produzir cinzas com composição química mais adequada ao uso como pozolana, isto é, com teor reduzido de carbono e alto percentual de sílica amorfa, foram realizadas queimas em forno tipo mufla (laboratorial) e em escala semi-industrial (cerâmica). É importante ressaltar que condições de queima como: temperatura, taxa de aquecimento, patamar e ambiente de queima interferem diretamente na atividade pozolânica de cinzas agroindustriais pozolânicas (CORDEIRO, 2006).

### 4.2.1. Queima em Escala de Laboratório

As cinzas CBCA1 e CBCA2 foram calcinadas em forno tipo mufla (Figura 4.2) do Laboratório de Estruturas do Programa de Engenharia Civil da COPPE/UFRJ (LABEST/COPPE), produzindo as cinzas denominadas CBCA1-600-3h, CBCA1-600-6h, CBCA2-600-3h.

As condições de queima foram estabelecidas com base na pesquisa de Cordeiro *et al.* (2009b), que estudou o processo de queima e caracterização de cinzas do bagaço da cana-de-açúcar com alta reatividade. Seis amostras de 60 g cada foram acondicionadas no forno em recipientes de alumina. A queima foi feita em dois patamares, o primeiro a 350°C e o segundo a 600°C. O tempo de residência em ambos os patamares foi de 3 horas para as cinzas CBCA1 e CBCA2. Em virtude da elevada perda ao fogo da CBCA1, uma segunda queima foi efetuada para esse material com tempo de residência no segundo patamar prolongado em 3 horas. Adotou-se uma taxa de aquecimento de 10°C/min para todas as queimas com resfriamento no próprio forno (sem controle). A Figura 4.3 mostra o aspecto da CBCA2 antes e após a queima a 600°C.



Figura 4.2- Forno tipo mufla do Laboratório de Estruturas da COPPE/UFRJ.



(a)



(b)

Figura 4.3- Aspecto da CBCA 2 na mufla: (a) antes da queima, (b) após a queima.

#### 4.2.2. Queima em Escala Semi-Industrial

Como o objetivo de produzir uma cinza sob condições de queima industrial optou-se por uma cerâmica (Art Cerâmica Sardinha) localizada no distrito de São Sebastião no Município de Campos dos Goytacazes/RJ. A Art Cerâmica produz tijolos e telhas das mais variadas formas e estilos através de quatro fornos tipo abóboda (Figura 4.4) com diâmetro da câmara de queima de 7 m e 2,5 m de altura útil.



Figura 4.4 - Forno tipo abóboda da Art Cerâmica Sardinha.

Os fornos da cerâmica utilizam dois tipos de combustíveis: escória de eucalipto e pó de serra. Optou-se, neste trabalho, pelos fornos que usavam como combustível a escória de eucalipto por conta da menor quantidade de impurezas (fuligem) geradas durante a queima.

As amostras de cinzas CBCA1 e CBCA2 foram acondicionadas em panelas cerâmicas (Figura 4.5) com massa de 750 g para a CBCA1 e 1200 g para a CBCA2. Ao serem colocadas no forno foram envolvidas pelos tijolos da cerâmica com ilustra a Figura 4.6. Além disso, pedaços de tijolos cerâmicos foram utilizados como calços para garantir a abertura da panela de 1,5 cm, o que possibilitou a circulação do calor e a saída dos gases de

queima. As cinzas produzidas, após a queima, foram denominadas: CBCA1-CER e CBCA2-CER.



(a)

(b)

Figura 4.5 – Cinza CBCA 2 no recipiente cerâmico (a) antes da queima e (b) após a queima.



(a)

(b)

Figura 4.6 – (a) Recipiente com CBCA1 no forno e (b) detalhe do recipiente.

As leituras das temperaturas de queima no forno da Art Cerâmica foram feitas por termopares (da cerâmica) localizados em diferentes pontos do forno. A Figura 4.7 mostra a posição de dois termopares em uma das entradas do forno. A Figura 4.8 mostra a variação da temperatura durante o período de uma das queimas realizadas. Como pode ser observado, a leitura da temperatura é iniciada com cerca de 140°C. Este fato é

decorrente da transferência do calor de outro forno para complementar a secagem das peças cerâmicas. A queima é feita com uma rampa de aquecimento de cerca de 12°C/h por aproximadamente 48 h. Após este período, a temperatura no forno é mantida entre 780 e 800°C por cerca de 52 h. Por fim, o resfriamento do material é feito em cerca de 48 h de forma não forçada, totalizando aproximadamente 150 h de queima.



Figura 4.7 - Posicionamento de dois termopares em um das entradas do Forno 2 da Art Cerâmica.

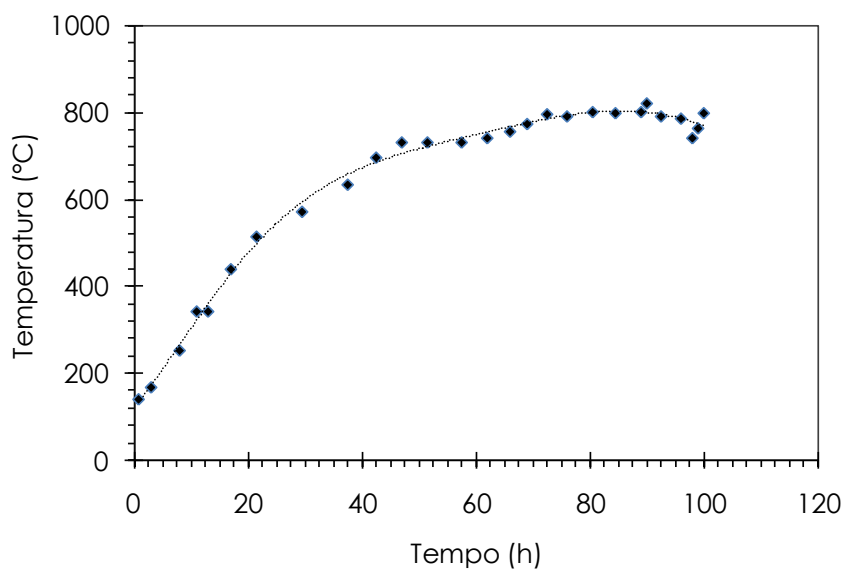


Figura 4.8 - Gráfico temperatura *versus* tempo de queima no forno da cerâmica.



Os rendimentos das CBCA1 e CBCA2 foram de 16 e 82%, respectivamente. Para a produção das quantidades necessárias para a conclusão do trabalho foram realizadas 5 queimas da CBCA1 e 4 queimas da CBCA2. A temperatura máxima manteve-se sempre na faixa entre 780 e 800°C e o tempo total de queima também foi o mesmo.

### 4.3. Superfície específica

O ensaio de superfície específica BET foi realizado para as cinzas estudadas. O método baseia-se na absorção física de moléculas de um gás inerte na superfície interna e externa de todos os poros abertos e interligados das partículas do sólido ensaiado (HOPPE, 2008). A superfície específica é definida como a área superficial por unidade de massa.

O ensaio foi realizado no INT em um equipamento da Micromeritics ASAP 2020. As amostras foram tratadas a 150°C sob vácuo por 24 h e a absorção de N<sub>2</sub> foi feita à temperatura do nitrogênio líquido (-196°C).

### 4.4. Difração de raios X

A difração de raios X foi utilizada para a identificação das fases cristalinas das cinzas. As análises de difração de raios X foram feitas no difratômetro BRUKER D8 Focus do Laboratório de Estruturas da COPPE/UFRJ. As condições experimentais adotadas foram:  $10^\circ \leq 2\theta \leq 60^\circ$ , tempo de aquisição de 2 s, passo de 0,02°, radiação Cu(K $\alpha$ ), tensão de 35 kV e corrente de 30 mA.

## 4.5. Seleção das cinzas do bagaço

Como dito anteriormente, as cinzas CBCA1 e CBCA2 foram moídas para um tamanho médio de aproximadamente 10  $\mu\text{m}$ . As cinzas CBCA1-600-6h, CBCA2-600-3h, CBCA2-600-6h foram resultados da queima controlada em forno mufla. Por sua vez, as cinzas CBCA1-CER e CBCA2-CER foram produzidas no forno tipo abóboda. A Figura 4.9 ilustra um fluxograma com as cinzas coletadas e produzidas.

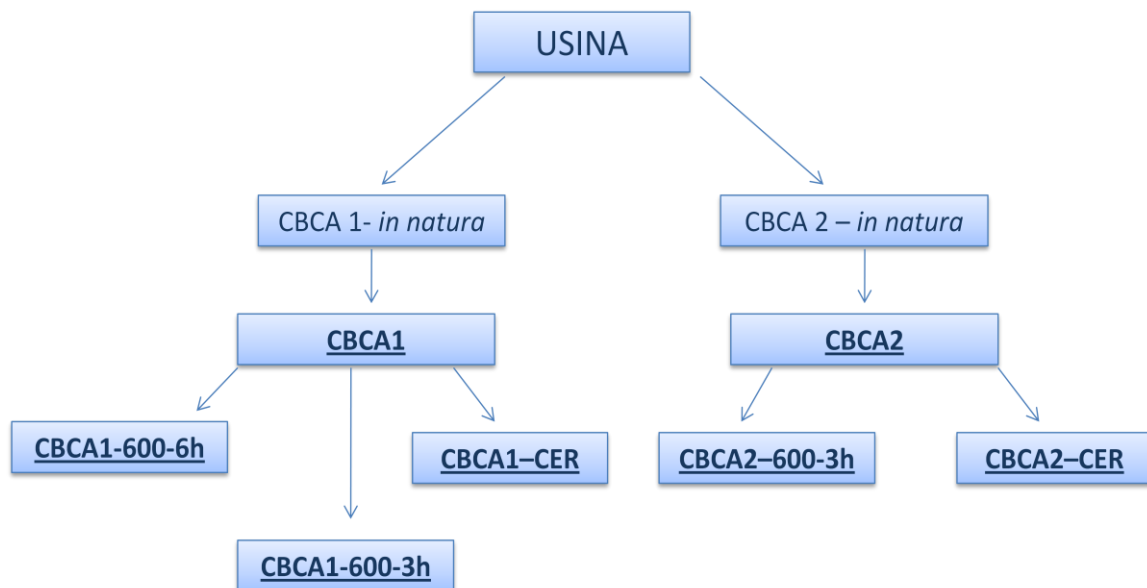


Figura 4.9 - Cinzas coletadas e produzidas durante a pesquisa.

## 4.6. Produção e caracterização das argamassas

### 4.6.1. Resistência à compressão

A resistência à compressão aos 28 dias foi a propriedade escolhida neste trabalho para avaliar a influência de diferentes teores de substituição de cimento pelas cinzas do bagaço da cana-de-açúcar. Na confecção das argamassas para ensaio de compressão foram empregados os seguintes materiais: cimento Portland para a cimentação de poços petrolíferos (CPP

Classe G), areia Normal brasileira, água destilada e aditivo superplastificante a base de policarboxilato, cujas características estão apresentadas no Capítulo 3.

Uma argamassa de referência foi preparada com relações areia-cimento e água-cimento iguais a 3,0 e 0,52, respectivamente. As demais argamassas foram confeccionadas da mesma maneira que a mistura de referência, porém com substituição de 5 a 35% (com variação de 5%) da massa de cimento pelo volume absoluto equivalente de cada uma das cinzas do bagaço de cana-de-açúcar, conforme mostra a Equação 1.

$$m_{CBCA} = \frac{X}{100} \cdot \frac{m_{CP} \cdot \delta_{CBCA}}{\delta_{CP}} \quad (\text{Equação 1})$$

Sendo:

$X$ : percentual da massa de cimento substituído por cinza do bagaço (entre 5 e 35%);

$m_{CBCA}$ : massa de cinza do bagaço;

$\delta_{CBCA}$ : massa específica da cinza do bagaço;

$\delta_{CP}$ : massa específica do cimento Portland;

$m_{CP}$ : massa de cimento na argamassa de referência (massa original).

As argamassas foram confeccionadas em misturador de bancada (Figura 4.10-a) seguindo os critérios da NBR 7215 (1996). Os passos seguidos durante a mistura dos materiais estão descritos a seguir:

1º Passo: mistura de água e superplastificante na cuba do misturador na velocidade baixa;

2º Passo: homogeneização do cimento e cinza;

3º Passo: inclusão do cimento e cinza na cuba e mistura por 1 min na velocidade baixa (Figura 4.10-b);

4º Passo: adição progressiva da areia à mistura com o misturador em movimento durante 30 s (Figura 4.10-c);

5º Passo: mistura por 1 min na velocidade alta;

6º Passo: repouso de 30 s;

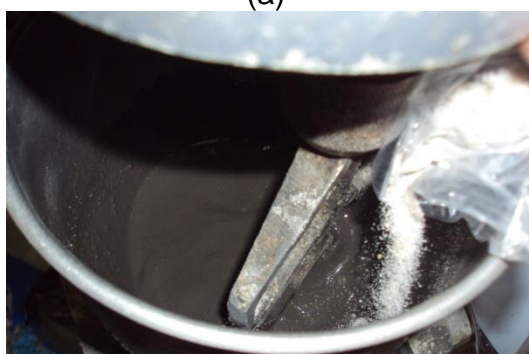
7º Passo: mistura final por 1 min na velocidade alta (Figura 4.10-d).



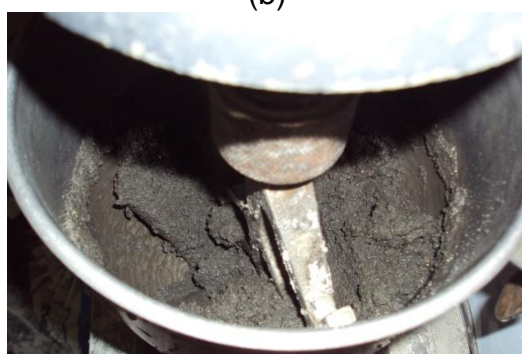
(a)



(b)



(c)



(d)

Figura 4.10 – Etapas da preparação da argamassa: (a) misturador de bancada; (b) mistura de água, superplastificante, cimento e cinza; (c) adição progressiva de areia; (d) mistura final.

Foram moldados 4 corpos de prova cilíndricos de 5 cm de diâmetro e 10 cm de altura por mistura. Os corpos de prova foram moldados em duas camadas (Figura 4.11-a), submetidos à vibração (Figura 4.11-b) por 1 min por camada em mesa vibratória e, em seguida, foram mantidos por 24 horas nos moldes protegidos contra a perda de umidade.



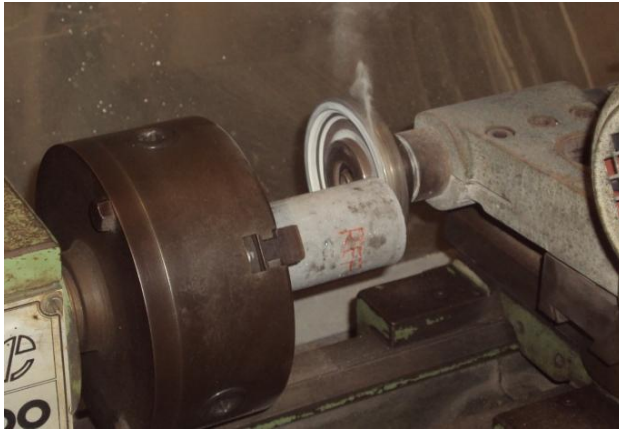
(a) (b)  
 Figura 4.11 – Moldagem dos corpos de prova: (a) preenchimento das camadas; (b) e vibração em mesa vibratória.

Após a desmoldagem, os corpos de prova foram umidificados com água destilada (Figura 4.12-a) antes de serem envolvidos por um filme plástico (Figura 4.12-b). Os corpos de prova foram colocados em recipientes e mantidos em cura na estufa durante 27 dias à uma temperatura de  $38 \pm 2^\circ\text{C}$ .



(a) (b)  
 Figura 4.12 – Corpo de prova desmoldado (a) após ser submetido a uma película de água e (b) sendo envolvido pelo filme plástico.

O faceamento dos corpos de prova foi realizado em torno mecânico, para então serem rompidos em prensa Shimadzu<sup>®</sup> UH-F1000kNI com velocidade de carregamento de 0,3 mm/min. Ambos os procedimentos foram realizados no LABEST/COPPE. A Figura 4.13-a ilustra a faceamento de um corpo de prova de referência e um confeccionado com a CBCA1 durante o ensaio na prensa (Figura 4.13-b).



(a)



(b)

Figura 4.13 – (a) Faceamento e (b) ruptura de um corpo de prova no LABEST/COPPE.

#### 4.6.2. Compacidade experimental

Para a dosagem dos concretos e argamassas foi utilizado um modelo teórico, o Método de Empacotamento Compressível (De Larrard, 1999), que visa à otimização de misturas granulares através do melhor arranjo entre as partículas. Sendo assim, a compacidade experimental dos constituintes torna-se uma propriedade primordial no estudo. Os ensaios executados para a determinação da compacidade dos constituintes das misturas foram: ensaio de compressão associado à vibração e demanda d'água.

##### 4.6.2.1. Ensaio de compressão e vibração

Para o cálculo das compacidades dos agregados foi utilizado um procedimento de empacotamento, proposto por de Larrard (1999) e adaptado por Silva (2004), que utiliza compressão associado à vibração. O ensaio (Figura 4.14) é feito através de um cilindro metálico (160 mm de diâmetro e 320 mm de altura) adaptado a uma mesa de vibração, um pistão com 10 kPa e um catetômetro para a leitura da altura de

compactação. O ensaio consiste, basicamente, na adição do material no cilindro (Figura 4.14-a) e aplicar sobre este uma pressão constante com um pistão de 10 kPa (Figura 4.14-b) em conjunto com o efeito de vibração, a uma frequência de 68 Hz durante 3 minutos. Após a vibração, determina-se a altura final (Figura 4.14-c) da camada compactada de agregado para o cálculo da compactidade (Equação 2) (SILVA, 2004).

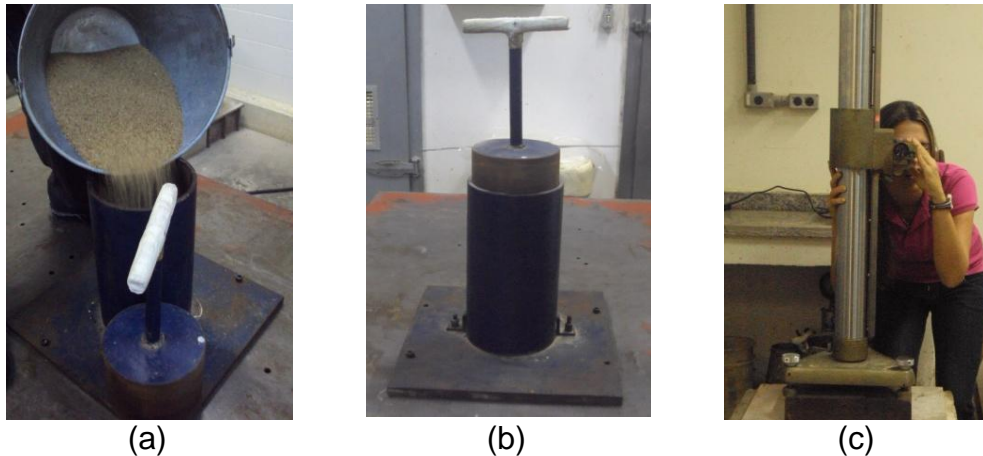


Figura 4.14 - Etapas do ensaio de compactidade: (a) introdução da amostra no cilindro, (b) posicionamento do pistão que exerce 10 kPa submetido a vibração e (c) leitura da posição do pistão após a vibração.

$$C = \frac{m}{A_e \cdot h_c \cdot \delta} \quad (\text{Equação 2})$$

Sendo:

C: compactidade;

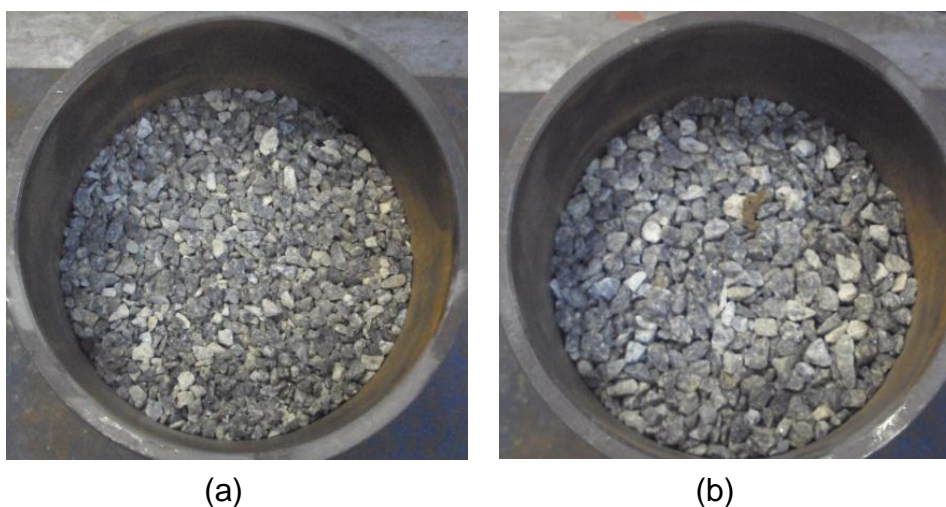
m: massa do material;

$A_e$ : área do cilindro;

$h_c$ : altura da camada do material ao fim do ensaio;

$\delta$ : massa específica do material.

Tanto a areia quanto a brita foram divididas em duas classes distintas e a massa de material usada nos ensaios foi de 3,0 e 7,5 kg, respectivamente. A Figura 4.15 ilustra o aspecto geral, após o ensaio, das amostras das duas classes distintas da brita utilizada na pesquisa.



(a) (b)  
Figura 4.15 - Aspectos das amostras (a) B<sub>1</sub> e (b) B<sub>2</sub> após o ensaio de compactação.

#### 4.6.2.2. Ensaio de demanda d'água

A compactação experimental do cimento e das 7 cinzas do bagaço da cana-de-açúcar foi determinada pelo ensaio de demanda d'água (DE LARRARD, 1999; SILVA, 2004). O ensaio tem como finalidade a obtenção de uma pasta com partículas compactadas ao máximo através da adição progressiva de água.

O ensaio de demanda d'água é realizado em misturador planetário de 2 litros (NBR 7215, 1996). Inicialmente, adiciona-se uma pequena quantidade de água à 350 g de amostra seca (Figura 16-a) com o misturador na velocidade baixa por 1 min. Após este período, uma nova adição de água é efetuada e a mistura é mantida por 1 min na velocidade alta. Adições sucessivas de água são feitas, passando pelas fases pendular (Figura 16-b), funicular (Figura 16-c) até o alcance do estado capilar (Figura 16-d), caracterizado pela formação de pasta homogênea e pela ausência de umidade na parte interna da cuba do misturador. A temperatura dos constituintes e do ambiente durante o ensaio é mantida em  $21 \pm 1^\circ\text{C}$ . O tempo médio de ensaio foi de 8 min. A massa de água necessária para que



a pasta alcance o ponto de demanda d'água foi calculada pela média aritmética de duas determinações.

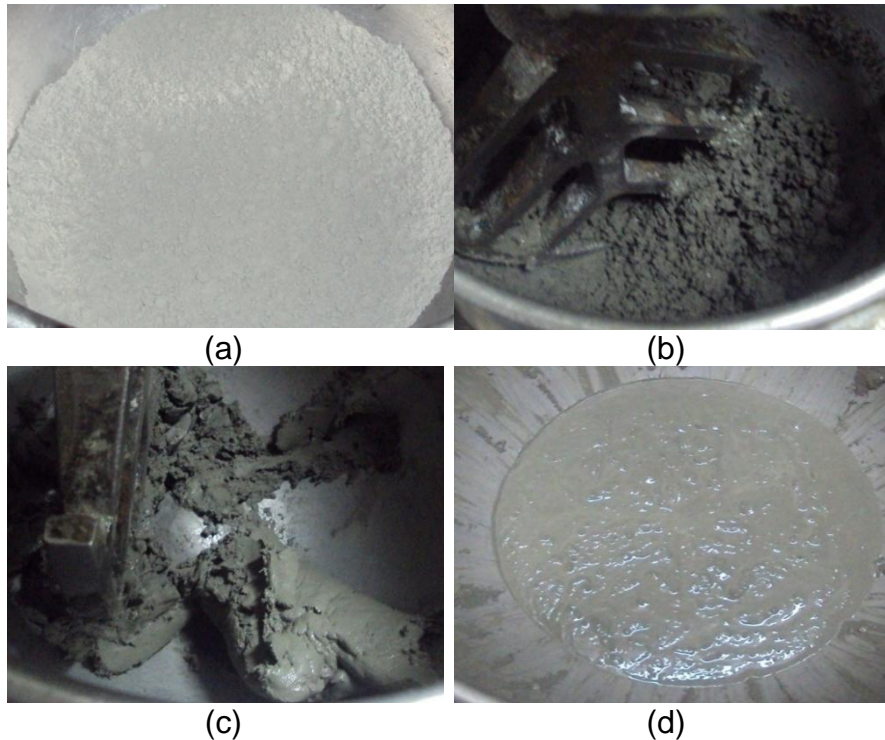


Figura 4.16 - Fases do empacotamento no ensaio de demanda d'água: material seco (a), fase pendular (b), fase funicular (c) e início da fase capilar (d).

A Equação 3 permite o cálculo da compacidade após a determinação da umidade da pasta correspondente ao ponto de demanda d'água.

$$c = \frac{1}{1 + \delta \cdot \frac{m_a}{m}} \quad (\text{Equação 3})$$

Sendo,

C: compacidade experimental;

$m_a$ : massa de água;

m: massa de material.

$\delta$  : massa específica do material.

#### 4.6.3. Atividade pozolânica

Três metodologias foram utilizadas nesta pesquisa para a determinação da atividade pozolânica das cinzas: índice de atividade pozolânica (IAP), chapelle modificado e condutividade elétrica. A primeira baseia-se na determinação da resistência à compressão de argamassas. No método chapelle modificado, a reatividade é determinada através da capacidade do material de fixar cal quando mantido em solução aquosa com óxido de cálcio. A terceira metodologia para a determinação da atividade pozolânica é relacionada com a condutividade elétrica para o material proposto em uma solução saturada de hidróxido de cálcio em determinado intervalo de tempo.

##### 4.6.3.1. Índice de atividade pozolânica com cimento Portland.

Para a avaliação da reatividade de um material, a ser empregado como aditivo mineral, o índice de atividade pozolânica é um significativo parâmetro, pois simula uma situação real de aplicação (CORDEIRO, 2006).

O ensaio seguiu os procedimentos da NBR 5752 (1992). O ensaio consiste na razão entre a resistência média a compressão de corpos de prova moldados com substituição de 35% de cimento pelo material avaliado e a resistência média de uma argamassa de referência (Equação 4). Por mistura foram moldados 4 corpos de prova cilíndricos com 5 cm de diâmetro e 10 cm de altura. Os procedimentos de moldagem, desmoldagem, cura e ruptura foram os mesmos dos descritos no item 4.6.1. Na Tabela 4.1 estão representadas as dosagens das argamassas confeccionadas para o ensaio.

Tabela 4.1 – Dosagens das argamassas confeccionadas no ensaio de índice de atividade pozolânica com cimento Portland.

Argamassas	Constituintes				
	Cimento	CBCA	Areia Normal	Água	SP - Glenium
Referência	500,0	—	1500,0	260,0	—
CBCA1	325,0	81,4	1500,0	257,2	4,06
CBCA2	325,0	116,5	1500,0	259,2	1,25
CBCA1-600-6h	325,0	124,8	1500,0	258,9	1,56
CBCA1-600-3h	325,0	117,0	1500,0	258,4	2,34
CBCA2-600-3h	325,0	129,0	1500,0	260,0	—
CBCA1-CER	325,0	135,0	1500,0	259,0	1,60
CBCA2-CER	325,0	131,0	1500,0	260,0	0,00

$$IAP = \frac{f_{cp}}{f_c} \cdot 100(\%) \quad (\text{Equação 4})$$

Sendo,

IAP: índice de atividade pozolânica com cimento Portland;

$f_c$ : resistência média à compressão, aos 28 dias, dos corpos de prova da argamassa de referência: moldados com cimento, areia e água;

$f_{cp}$ : resistência média à compressão, aos 28 dias, dos corpos-de-prova moldados com substituição de 35 % da massa de cimento, usado na referência, por material pozolânico.

#### 4.6.3.2. Chappelle modificado

De forma sucinta, o método consiste em manter uma solução com 1,00 g de óxido de cálcio, 1,00 g de cinza e 250,00 g de água (sem dióxido de carbono) aquecida sob agitação à 90°C, durante um tempo de 16 h. O resultado é expresso pela quantidade de CaO fixado por grama de cinza pozolânica e quanto maior a fixação mais reativo é o material. O valor mínimo de consumo de CaO necessário para o material se apresentar consideravelmente como pozolânico é 330 mg/g (RAVERDY *et al*, 1980).

O ensaio de Chapelle Modificado, realizado no Instituto de Pesquisas Tecnológicas (IPT/SP), foi feito para todas as cinzas do bagaço da cana-de-açúcar produzidas na pesquisa.

#### 4.6.3.3. Condutividade elétrica

Lúxan *et al.* (1989) propuseram que a atividade pozolânica pode ser medida com base na variação da condutividade elétrica. O ensaio, realizado no LECIV/UENF, inicia-se com a inclusão de 98,7 mg de hidróxido de cálcio [Ca (OH)<sub>2</sub>] a 70 g de água destilada aquecida à 40°C ±1°C. Com o auxílio de um agitador magnético a solução se estabiliza em 20 minutos, para então incluir 1,75 g da cinza a ser ensaiada. As leituras foram feitas sucessivamente durante 20 min.

Após a adição do material a condutividade elétrica decresce em consequência da menor quantidade de íons cálcio Ca<sup>+2</sup> e hidroxilas (OH)<sup>-</sup> na solução. A atividade pozolânica, proposta por Lúxan *et al.*, (1989), é definida como a variação da condutividade elétrica no intervalo de tempo de 2 minutos da inclusão da cinza à mistura.

A Tabela 4.2 apresenta a classificação proposta por Lúxan *et al.* (1989), na qual o material apresenta moderada atividade pozolânica se a variação de condutividade ( $\Delta C$ ) for maior do que 0,4. Caso o valor de  $\Delta C$  seja maior que 1,2, o material é classificado como altamente pozolânico.

Tabela 4.2- Tabela de classificação pozolanicidade do material, proposta por Lúxan *et al.* (1989).

Classificação do Material	Variação da condutividade ( $\Delta C$ )
Não pozolânico	$\Delta C < 0,4$
Pozolanicidade moderada	$0,4 < \Delta C < 1,2$
Alta pozolanicidade	$\Delta C > 1,2$

## 4.7. Dosagem, produção e caracterização dos concretos

Através da caracterização das cinzas do bagaço da cana-de-açúcar estudadas e dos resultados obtidos com a produção das argamassas com substituição parcial de cimento por volume equivalente de cada cinza e da disponibilidade dos materiais, foram selecionadas 3 cinzas (CBCA2, CBCA2-600-3h e CBCA2-CER) para a confecção dos concretos e o teor ideal de substituição, que juntamente com o de referência totalizaram 4 concretos.

### 4.7.1. Dosagem

A dosagem do concreto de referência foi feita com o auxílio do programa computacional Betonlab Pro2<sup>®</sup> desenvolvido no LCPC, a partir do Modelo de Empacotamento Compressível, proposto por De Larrard (1999). O programa tem por objetivo às propriedades do concreto no estado fresco e endurecido através de uma simulação de diferentes composições e proporções de constituintes. O modelo está descrito em detalhes em De Larrard (1999), Sedran (1999) e Silva (2004).

De forma simplificada, programa realiza a dosagem em três etapas. A primeira etapa consistiu na elaboração de um banco de dados com as propriedades dos materiais constituintes do concreto: cimento, agregados (areia e brita) e superplastificante, conforme ilustra a Tabela 4.3. Os parâmetros “p”, que caracteriza a aderência desenvolvida pela pasta de cimento com o agregado e varia segundo a caracterização deste, e “q”, que representa a resistência intrínseca do agregado, foram os mesmos adotados por Silva (2004). Na segunda etapa foram definidos os parâmetros de abatimento do tronco de cone e de dosagem, que nesta pesquisa foi a resistência aos 28 dias de 40 MPa. Além disso, um traço inicial foi estimado fixando a quantidade de água e cimento Portland ( $\text{kg}/\text{m}^3$ ), porcentagem de cada um dos agregados em relação ao total de

agregados e a dosagem do aditivo superplastificante em relação à massa de cimento. Com isso, o programa calculou o traço inicial. A última etapa, responsável pela otimização da mistura, onde foram estabelecidos os parâmetros a serem otimizados, os graus de liberdade, modificações das composições dos constituintes em relação à composição inicial e a condição de contorno principal: minimizar cimento.

Tabela 4.3 – Propriedades dos constituintes para a criação do banco de dados.

<b>Agregados</b>	<b>Cimento Portland</b>	<b>Superplastificante</b>
Massa específica	Massa específica	Massa específica
Porosidade e absorção de água	Resistência à compressão	Dosagem de saturação
Granulometria	Granulometria	Teor de sólidos
Compacidade	Composição de Bogue	
Módulo de elasticidade	Compacidade	
Parâmetros “p” e “q”		

O concreto de referência foi dosado para condições usuais de utilização na construção civil da região seguindo os seguintes parâmetros: abatimento do tronco de cone entre 180 e 200 mm e resistência a compressão aos 28 dias igual não superior a 40 MPa. O procedimento completo de dosagem no programa encontra-se em Anexo B. A Figura 4.17 apresenta a tela final do programa Betonlab Pro2<sup>®</sup> após todas as etapas do processo de otimização.

BétonlabPro 2 - [C40_3dez2010.bt]										
Fichier Edition Constituants Sélection Modifications ?										
Composition		Gâchée n°	1	2	3	17	23	24	25	26
G1 (%)	52,7	G1 (kg/m3)	888	867	849,2	964	893,4	893,7	893,9	893,8
S1 (%)	47,3	S1 (kg/m3)	862,6	842,2	824,9	718,9	779	779,2	779,4	779,3
C1 (kg/m3)	387,4	C1 (kg/m3)	400	400	400	387,4	387,4	387,4	387,4	387,4
SP1 (%)	0,01	SP1 (kg/m3)	3,75	3,75	3,75	0	0,61	0,3	0	0,18
Eau eff (kg/m3)	219,4	Eau (kg/m3)	188	207,7	227,5	229,7	229,1	229,3	229,6	229,4
Gâchée n°26		G1 (%)	50	50	50	56,57	52,7	52,7	52,7	52,7
Granularité		S1 (%)	50	50	50	43,43	47,3	47,3	47,3	47,3
Remplissage		Taux de saturation (%)	0,35	0,35	0,35	0,35	0,35	0,35	0,35	0,35
Environnement		Taux de superplastifiant (%)	0,3	0,3	0,3	0	0,05	0,03	0	0,01
Coût fixe (Euro/m3)		Eau eff	180	200	220	219,4	219,4	219,4	219,4	219,4
Confinement: Aucun		Air occlus (%)	2,5	2	1,4	1,7	2	2	2	2
		Rapport G/S	1,029	1,029	1,029	1,341	1,147	1,147	1,147	1,147
		Eff/C	0,45	0,5	0,55	0,566	0,566	0,566	0,566	0,566
		Environnement	1	1	1	1	1	1	1	1
		C + kA	400	400	400	387	387	387	387	387
		Eff / (C + kA)	0,45	0,5	0,55	0,566	0,566	0,566	0,566	0,566
		Densité	2,342	2,321	2,305	2,3	2,29	2,29	2,29	2,29
		Seuil de cisaillement (Pa)	5008	1705	822	5972	2752	4141	6909	5013
		Viscosité plastique (Pa.s)	1080	547	286	396	362	388	420	400
		Affaissement (cm)	0	7,7	20,8	0	0	0	0	0
		fc1 (MPa)	31,2	24,7	19,8	16,4	15,4	15,5	15,5	15,5
		fc3 (MPa)	39,5	33,5	29,1	26,1	25,2	25,3	25,3	25,3
		fc7 (MPa)	44,3	38,7	34,4	31,7	30,9	30,9	30,9	30,9
		fc28 (MPa)	50,1	44,8	40,9	38,3	37,6	37,6	37,7	37,6
		Ei28 (GPa)	37,4	34,8	32,6	31,2	31,2	31,2	31,2	31,2
		Indice de ségrégation (confiné)	0,953	0,958	0,962	0,957	0,959	0,958	0,957	0,958
		Indice de serage du béton non confiné	9,423	7,834	6,734	7,312	7,131	7,244	7,376	7,294
		Indice de serage du béton confiné	9,423	7,834	6,734	7,312	7,131	7,244	7,376	7,294

Figura 4.17 - Tela final de dosagem no programa Betonlab Pro2®.

A partir da dosagem do concreto de referência foram dosados os concretos com as 3 cinzas do bagaço selecionadas: CBCA2, CBCA2-600-3h e CBCA2-CER, com teor de substituição de 20% da massa de cimento do concreto de referência por volume equivalente de cinza do concreto de referência. O teor ótimo de substituição (20%) se deu em função dos resultados de resistência à compressão das argamassas produzidas anteriormente. Os traços dos concretos confeccionados estão apresentados na Tabela 4.4, onde pode ser visto que, em comparação ao concreto de referência, os concretos com cinzas apresentam uma redução significativa no teor de cimento. Além disso, vale ressaltar que o teor de aditivo superplastificante, usado para manter a consistência da mistura, para o concreto com CBCA2 foi menor comparado aos demais.

Tabela 4.4- Composição dos concretos.

Concretos	Materiais (kg/m <sup>3</sup> )					
	Cimento	Cinza	Areia	Brita	Água	SP*
Referência	387,40	–	779,20	893,70	229,30	0,30
C-CBCA2	309,92	51,57	779,30	893,80	229,40	0,18
C-CBCA2–600-3h	309,92	57,07	779,20	893,70	229,30	0,30
C-CBCA2–CER	309,92	57,93	779,20	893,70	229,30	0,30

\*SP – superplastificante.

#### 4.7.2. Mistura, confecção e cura dos corpos de prova

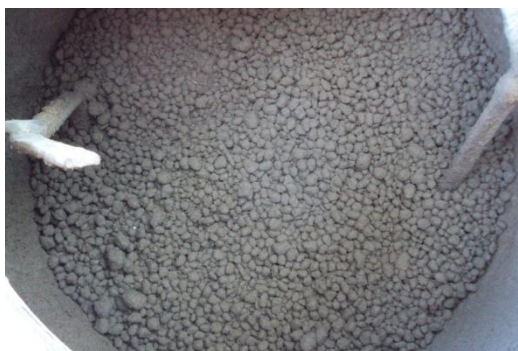
Os concretos foram confeccionados em betoneira de eixo inclinado com capacidade máxima de 145 litros. A sequência de produção adotada foi:

- 1º Passo: cimento, cinza e brita – mistura por 1 min (Figura 4.18–a e b);
- 2º Passo: inclusão de 70% da água – mistura por 1 min (Figura 4.18–c e d);
- 3º Passo: adição de areia – mistura por 1 min (Figura 4.18-e);
- 4º Passo: adição de superplastificante e do restante da água (30%) – mistura por 1 min;
- 5º Passo: parada da betoneira – 2 min (Figura 4.18-f);
- 6º Passo: mistura final – 3 min (Figura 4.18–g).





(a)



(b)



(c)



(d)



(e)



(f)



(g)

Figura 4.18 – Etapas de produção dos concretos na betoneira: (a) colocação do cimento e brita; (b) aspecto após mistura inicial 60 s; (c) colocação de 70% da água na mistura; (d) aspecto após mistura de mais 60 s; (e) inclusão da areia; (f) betoneira parada por 120 s; (g) aspecto da mistura final.

Após a mistura, os concretos foram moldados (Figura 4.19–a) em cilindros metálicos em duas camadas. Para cada camada foi realizado adensamento de 30 s com um vibrador de imersão posicionado externamente sobre a base metálica do molde, conforme ilustra a Figura 4.19–b.



(a)



(b)

Figura 4.19 – Corpo de prova do concreto confeccionado com CBCA 2: (a) Moldagem em duas camadas; (b) a vibração com vibrador posicionado externamente ao molde.

Foram confeccionados 10 corpos de prova com 20 cm de altura e 10 cm de diâmetro e 11 corpos de prova com 15 cm de altura e 7,5 cm de diâmetro, totalizando 21 unidades por mistura. Os corpos-de-prova foram mantidos nos moldes por 24 h (Figura 4.20–a) protegidos da perda de umidade (Figura 4.20–b).



(a)



(b)

Figura 4.20 – Corpos de prova com CBCA2 (a) mantidos por 24 h nos moldes e (b) cobertos com pano úmido para evitar a perda de umidade.

A cura dos concretos foi feita por imersão em água saturada com cal. Nesta fase os corpos de prova foram mantidos à temperatura ambiente até as idades de ensaio. Todos os concretos foram curados da mesma forma.

#### 4.7.3. Caracterização dos concretos

A determinação da consistência dos concretos foi feita através dos ensaios de abatimento do tronco de cone de Abrams, 10 min após o final da mistura, de acordo com a NBR NM 67 (1998). O ensaio consiste no preenchimento de três camadas do concreto em um tronco de cone. Cada camada deve ser apiloada com 25 golpes, promovendo o correto adensamento da camada. Em seguida, retira-se o funil, colocando-o ao lado do concreto para a medida do abatimento do concreto. O ensaio foi feito para os 4 concretos confeccionados. A Figura 4.21 ilustra a medição do abatimento após o ensaio com o concreto CBCA2.



Figura 4.21 – Ensaio de abatimento do tronco de cone de Abrams do concreto com a cinza CBCA 2, realizado no LECIV/UENF.

O ensaio de absorção total de água foi realizado de acordo com a NBR 9778 (1987), que possibilita o cálculo do índice de vazios (Equação 5), da massa específica (Equação 6) e da absorção total (Equação 7) do concreto endurecido.

$$P = \frac{m_T - m_S}{m_T - m_I} \cdot 100 \quad (\text{Equação 5})$$

$$\delta = \frac{m_S}{m_S - m_I} \quad (\text{Equação 6})$$

$$A = \frac{m_T - m_S}{m_S} \cdot 100 \quad (\text{Equação 7})$$

Sendo:

$P$ : porosidade;

$\delta$ : massa específica do material;

$A$ : absorção de água;

$m_T$ : massa saturada em água;

$m_S$ : massa seca;

$m_I$ : massa saturada e imersa em água.

Após 28 dias de cura em água saturada com cal, a região central de 3 corpos de prova de 20 cm de altura e 10 cm de diâmetro de cada um dos quatro concretos foi cortada, o que resultou em três corpos de prova com aproximadamente 5 cm de altura e 10 cm de diâmetro. A Figura 4.22 ilustra um corpo de prova do concreto com CBCA2-CER após o corte.

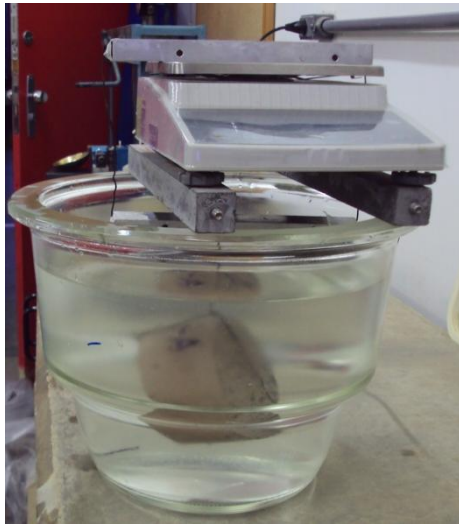


Figura 4.22 – Corpo de prova com 20 cm de altura e 10 cm de diâmetro cortado em 3 partes com 5 cm de altura.

A massa seca dos corpos de prova foi lida, após a secagem destes em estufa (Figura 4.23-a) no LECIV/UENF onde permaneceram até a constância de massa (12 dias). Então, os corpos de prova foram imersos em água destilada por 8 dias, tempo suficiente para que os poros acessíveis fossem saturados por água. Após este período, leituras da massa saturada e imersa em água (Figura 4.23-b) e da massa saturada em superfície seca (Figura 4.23-c) dos corpos de prova dos concretos foram feitas.



(a)



(b)



(c)

Figura 4.23 – Etapas do corpo de prova no ensaio de absorção: (a) secagem em estufa, (b) pesagem da amostra saturada e imersa em água, (c) pesagem da amostra saturada em superfície seca.

#### 4.7.3.1. Resistência à compressão e módulo de elasticidade

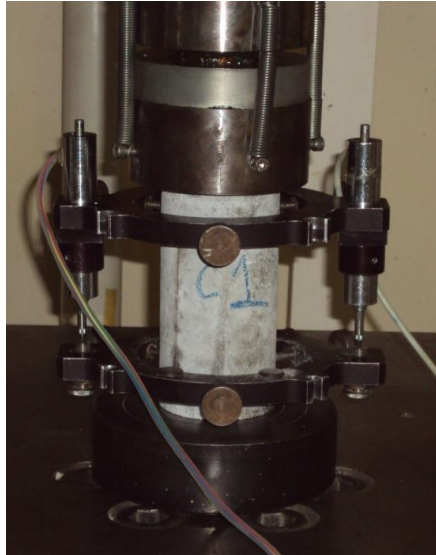
Antes dos ensaios de resistência, os corpos de prova foram faceados em torno mecânico no LABEST/COPPE de forma a garantir a planicidade de suas superfícies, sabendo que superfícies irregulares e não planas causam problemas como transmissão não uniforme da tensão de compressão acarretando concentração de tensões em pontas da superfície do corpo-de-prova, antecipando a ruptura da amostra (SILVA, 2004).

Foram ensaiados corpos de prova cilíndricos com 15 cm de altura e 7,5 cm de diâmetro, seguindo a NBR 5739 (1994), em prensa SHIMADZU®

UH-F1000kNI (Figura 4.24-a) com velocidade de carregamento de 0,3 mm/min. Foram rompidos 4 corpos de prova por idade e mistura. As idades escolhidas foram: 3, 7 e 28 dias. Na Figura 4.24-b pode ser visto o detalhe do ensaio com o concreto de referência.



(a)



(b)

Figura 4.24- Ensaio de resistência a compressão: (a) corpo de prova sendo ensaiado na prensa; (b) detalhe.

Transdutores elétricos foram utilizados para leitura dos deslocamentos longitudinais. Com isso, o comportamento tensão versus deformação foi verificado, determinando assim, as deformações de pico dos concretos. O cálculo do módulo de elasticidade secante foi realizado de acordo com a Equação 8, conforme NBR 8522 (2003).

$$E = \frac{\sigma_1 - \sigma_2}{\varepsilon_1 - \varepsilon_2} \quad (\text{Equação 8})$$

Sendo,

$E$ : módulo de elasticidade secante;

$\sigma_1$ : tensão correspondente a deformação de  $5 \cdot 10^{-5}$ ;

$\sigma_2$ : tensão correspondente a 30% da tensão máxima;

$\varepsilon_1$ : deformação de  $5 \cdot 10^{-5}$ ;

$\varepsilon_2$ : deformação correspondente à tensão  $\sigma_2$ .

#### 4.8. Metodologia de avaliação estatística para os resultados experimentais

A partir dos ensaios experimentais dos ensaios nas argamassas e nos concretos, 2 técnicas estatísticas foram utilizadas para validar os resultados experimentais (para 4 determinações). Inicialmente foi utilizado o teste de variância (ANOVA), ao nível de 5% de probabilidade ( $p < 0,05$ ) e em seguida o teste de médias de Duncan (COSTA, 2002). O teste de variância permite que vários grupos sejam comparados simultaneamente, utilizando variáveis contínuas. O teste é paramétrico (a variável de interesse deve ter distribuição normal) e os grupos têm que ser independentes. O método de comparações múltiplas de Duncan que é complementar ao primeiro e tem como objetivo detectar diferenças entre médias.



## 5. Resultados

### 5.1. Influência do tempo de moagem na granulometria das cinzas do bagaço

As cinzas CBCA1 e CBCA2 foram moídas em moinho de bolas conforme descrito no item 4.1. A escolha do tempo de moagem foi baseada no estudo de Cordeiro *et al.* (2009), que investigaram o papel do tipo de moinho e do circuito de moagem em laboratório na superfície específica e na atividade pozolânica de cinzas residuais do bagaço e da casca do arroz. Sendo assim, as cinzas foram moídas com o objetivo de produzir uma distribuição granulométrica com 50% das partículas menores ( $D_{50}$ ) que 10  $\mu\text{m}$ .

A Figura 5.1 mostra as curvas granulométricas da CBCA1 para os tempos de moagem de 1, 2, 4 e 8 horas. É possível observar que a moagem foi efetiva na redução do tamanho de partículas da CBCA1-*in natura*. Além disso, as granulometrias das cinzas moídas a 4 e 8 horas foram similares. Isto resultou na escolha da moagem da CBCA1 por 4 horas, tempo que acarretou um  $D_{50}$  igual a 3,5  $\mu\text{m}$ .

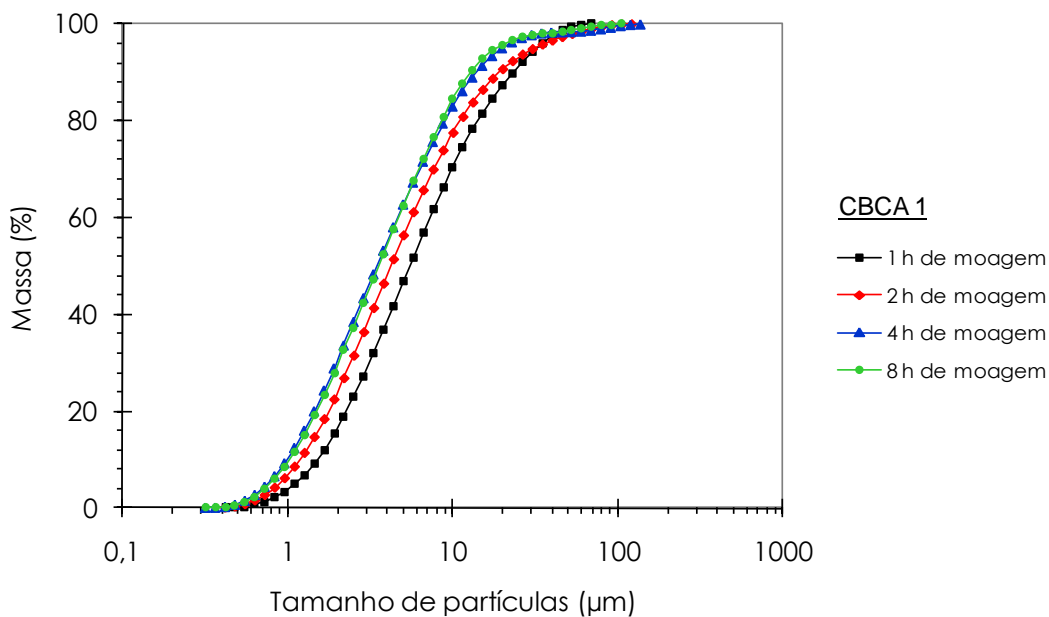


Figura 5.1 – Distribuição granulométrica da CBCA 1 em diferentes tempos de moagem.

O estudo de moagem da CBCA2 foi feito para os mesmos tempos adotados anteriormente. A Figura 5.2 mostra as distribuições granulométricas das diferentes amostras, que apresentaram uma grande variação de granulometria para os diferentes tempos estudados. Assim, o tempo de moagem selecionado para a CBCA2 foi de 8 horas para um  $D_{50}$  de 4,7 µm. Cabe ressaltar, neste caso, que a CBCA2-*in natura* apresentou partículas maiores em comparação com a CBCA1-*in natura*. Este fato, em conjunto com a presença considerável de quartzo em sua composição, contribuiu para um tempo elevado de moagem.

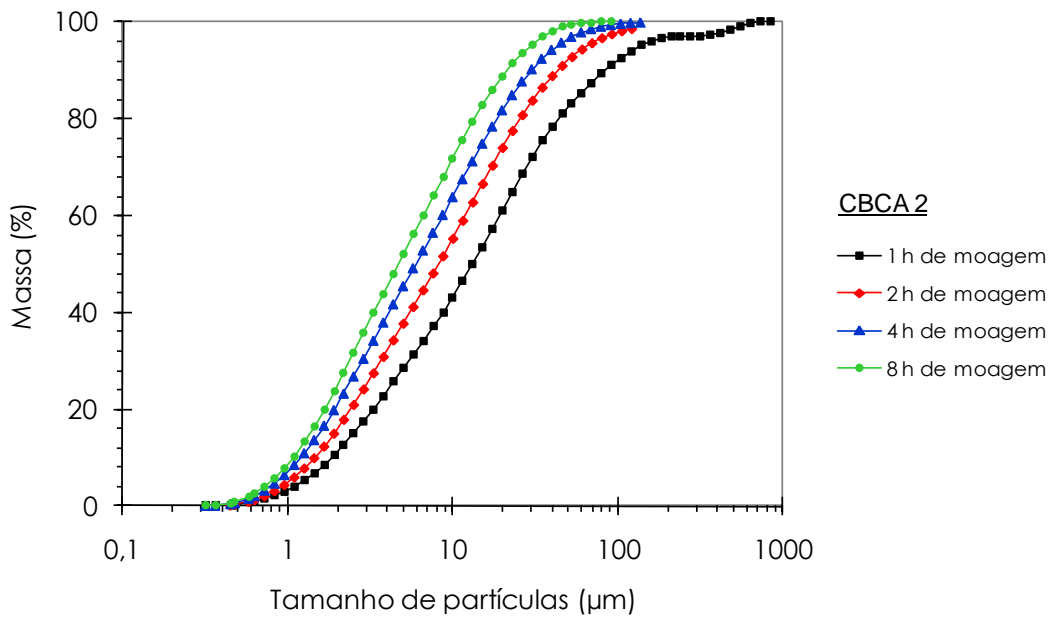


Figura 5.2 - Distribuição granulométrica da CBCA 2 em diferentes tempos de moagem.

Após o estudo de moagem, as cinzas CBCA1 (moída por 4 horas) e CBCA2 (moída por 8 horas) passaram por processos de queima em laboratório e em escala semi-industrial como o objetivo de produzir cinzas com composição química mais adequada ao uso como pozolana, isto é, com teor reduzido de carbono e, conseqüentemente, alto percentual de sílica. Essas queimas geraram cinzas com granulometrias um pouco maiores, como ilustra a Figura 5.3. Este fato está de acordo com o constatado por Cordeiro *et al.* (2009), que observaram que a medida que se aumenta a temperatura de queima das cinzas, aumenta-se também o tamanho médio das partículas.

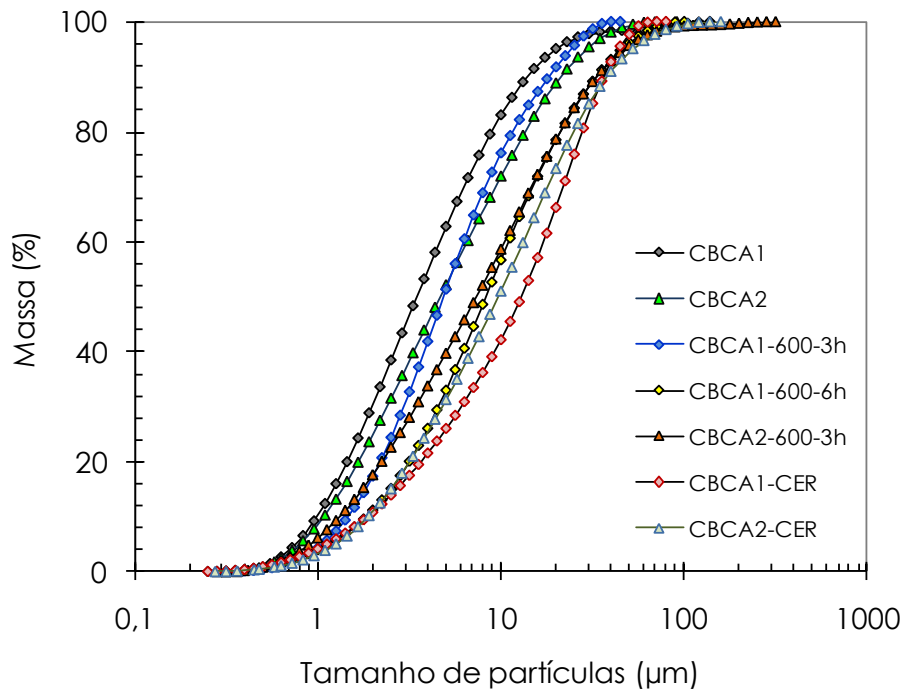


Figura 5.3 - Distribuição granulométrica das cinzas do bagaço.

A Tabela 5.1 mostra os tamanhos médios de partícula e as superfícies específicas BET das cinzas do bagaço estudadas. É importante ressaltar que fatores como granulometria, tempo de calcinação e superfície específica das cinzas estão diretamente relacionados. O tamanho médio das partículas é indiretamente proporcional à superfície específica das cinzas, como se constatou, por exemplo, nos resultados da CBCA1-4h e CBCA2-8h. Porém, como se pode observar nas cinzas calcinadas, o aumento no tempo de queima acarretou um pequeno aumento no tamanho médio das partículas e, conseqüentemente, redução na superfície específica das cinzas. Esse pequeno acréscimo no tamanho médio das partículas foi maior para as cinzas provenientes da CBCA1 e isso ocorreu porque o aumento na temperatura de queima ocasionou provavelmente uma consolidação de partículas aglomeradas.

Os elevados valores de superfície específica da CBCA1-4h e CBCA1-600-3h, em relação às demais, estão associados à presença de carbono nas amostras (CORDEIRO, 2006), evidenciadas pela coloração escura das cinzas e pelos altos valores de perda ao fogo (Tabela 5.2).

A cinza CBCA2-600-6h apresentou uma superfície específica igual a  $24,0 \times 10^3 \text{ m}^2/\text{kg}$ . Este valor é próximo ao obtido por Cordeiro *et al.* (2009c), que estudaram uma cinza do bagaço queimada a  $600^\circ\text{C}$  durante 6 horas, mesmas condições adotadas para a CBCA2-600-6h.

Tabela 5.1 – Diâmetro médio das cinzas estudadas.

CBCA	$D_{50}$ ( $\mu\text{m}$ )	Superfície específica BET ( $10^3 \text{ m}^2/\text{kg}$ )
CBCA1	3,5	393,0
CBCA2	4,7	35,0
CBCA1–600-3h	4,9	97,0
CBCA1–600-6h	8,3	24,0
CBCA2–600-3h	7,4	25,0
CBCA1–CER	13,0	8,0
CBCA2–CER	9,6	4,0

## 5.2. Composição química e mineralógica

As composições químicas das cinzas provenientes das CBCA1 e CBCA2 estão ilustradas nas Tabelas 5.2 e 5.3. De acordo com os resultados é possível observar que as queimas tornaram as cinzas adequadas, com exceção da CBCA1-600-3h, aos requisitos químicos indicados na NBR 12653 (1992), que indica um teor máximo de  $\text{SO}_3$  de 5%, uma soma dos percentuais de  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$  superior ao valor mínimo de 70% para materiais pozzolânicos e uma máxima perda ao fogo igual a 6%.

Os valores de perda ao fogo das cinzas CBCA1 e CBCA2 são altos e foram reduzidos consideravelmente na medida em que as cinzas foram queimadas. Conseqüentemente, o teor de sílica das cinzas também

aumentou. Cabe ressaltar que a perda ao fogo da cinza está condicionada à presença de matéria orgânica na forma de carbono livre (FUAD *et al.*, 1995). Isto pode ser evidenciado em Morales *et al.* (2009), que ao queimarem a mesma cinza em duas temperaturas distintas obtiveram um teor de SiO<sub>2</sub> de 58,61% e de 2,73% de perda ao fogo, para 800°C e 59,35% de sílica e 0,81% de perda ao fogo para a queima à 1000°C.

Tabela 5.2 – Composição química (% em massa) das cinzas geradas a partir da cinza CBCA1–*in natura*.

Composto	CBCA1	CBCA1-600-3h	CBCA1-600-6h	CBCA1-CER
SiO <sub>2</sub>	10,18	52,65	61,75	62,15
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	1,19	8,36	10,13	9,69
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,92	6,38	6,58	7,39
CaO	1,57	4,03	4,29	4,70
K <sub>2</sub> O	1,29	3,87	4,12	4,49
MgO	-	2,86	3,58	3,31
SO <sub>3</sub>	1,36	2,62	2,87	3,03
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	1,00	2,86	3,21	3,31
TiO <sub>2</sub>	0,12	0,31	0,28	0,36
MnO	0,11	0,39	0,40	0,45
Perda do fogo	82,24	15,64	2,79	1,12

Tabela 5.3 - Composição química das cinzas geradas a partir da cinza CBCA2–*in natura*.

Composto	CBCA 2	CBCA2-600-3h	CBCA2-CER
SiO <sub>2</sub>	53,17	69,58	70,92
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	13,92	15,72	16,09
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	4,44	5,68	5,79
CaO	1,48	1,33	1,35
K <sub>2</sub> O	2,35	2,15	2,19
SO <sub>3</sub>	1,63	1,56	1,59
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	1,25	0,93	0,95
TiO <sub>2</sub>	0,76	0,88	0,90
MnO	0,08	0,08	0,09
Perda ao fogo	20,92	2,09	0,21

Os resultados mostraram as cinzas CBCA1 e CBCA2 com valores de SiO<sub>2</sub>, após a calcinação, entre 52 à 62% e 53 a 71%, respectivamente. Esses resultados se mostraram coerentes com estudos realizados por Payá *et al.* (2002), que após a calcinação obtiveram uma cinza com teor de sílica igual a 59,9% e Ganesan *et al.* (2007) que estudaram uma cinza com 64,2%. Além destes autores, vale ressaltar que Freitas (2005) estudou a mesma matéria prima da CBCA2, que apresentou um teor de sílica, após a queima a 600°C durante 4 h, de aproximadamente 68% em massa. Estes resultados confirmam a utilização das cinzas calcinadas como matéria prima nesta pesquisa, no que diz respeito à composição química.

A cinza CBCA2 apresentou um menor percentual de perda ao fogo em comparação com a CBCA1 e uma maior quantidade de sílica, que pode ser justificado por uma maior contaminação por quartzo, comprovado nas análises de difração de raios X. De acordo com Cordeiro (2006), este mineral apresenta-se como o principal contaminante da cinza do bagaço da cana-de-açúcar produzidas em caldeiras de unidades de produção de açúcar e/ou álcool.

A Figura 5.4 mostra os valores de massa específica e as compacidades das cinzas estudadas. É possível observar que com o aumento da temperatura de queima e conseqüente diminuição na quantidade de carbono das cinzas, houve um acréscimo progressivo nos valores de massa específica (CORDEIRO, 2006). Isto pôde ser visto pelas cinzas calcinadas CBCA1-600-3h, CBCA1-600-6h e CBCA1-CER que apresentaram acréscimos nos valores das massas específicas de 48, 53 e 65%, respectivamente, quando comparados a CBCA1. Com relação às cinzas CBCA2-600-3h e CBCA2-CER, esses percentuais foram menores, cerca de 11 e 12%, respectivamente, comparados a CBCA2.

De acordo com os valores das compacidades das cinzas (Figura 5.4), é possível observar que a calcinação provocou uma redução nos valores das compacidades. As cinzas CBCA1 e CBCA2 apresentaram valores de 0,512 e 0,602, respectivamente, e quando calcinadas estes valores foram reduzidos. As cinzas que apresentaram os menores valores foram a CBCA1-CER (0,25) e CBCA2-CER (0,48).

Tabela 5.4 – Valores de massa específica e compacidade das cinzas estudadas.

CBCA	Massa específica (kg/m <sup>3</sup> )	Compacidade
CBCA1	1.475	0,51
CBCA2	2.110	0,60
CBCA1-600-3h	2.188	0,35
CBCA1-600-6h	2.260	0,41
CBCA2-600-3h	2.335	0,52
CBCA1-CER	2.440	0,23
CBCA2-CER	2.370	0,48



### 5.3. Difração de raios X

Através do método de difração de raios X tornou-se possível identificar as fases cristalinas das cinzas do bagaço de cana-de-açúcar estudadas. As Figuras 5.3 e 5.4 ilustram os difratogramas das cinzas CBCA1 e CBCA2, respectivamente. É possível observar que a cinza CBCA1 apresentou caráter amorfo, predominantemente influenciado pelo carbono, além da presença de quartzo. O difratograma da CBCA2 mostrou uma cinza cristalina, provavelmente com uma pequena parcela de compostos amorfos, caracterizada pelo sensível desvio da linha-base entre os ângulos de Bragg de 20° e 30°. Ambas as cinzas mostraram a presença de quartzo, que pode ser considerado um contaminante, por ser um material de característica inerte no que se refere à atividade pozolânica. A presença de quartzo foi mais evidente na cinza CBCA2, que também contém microclínio ( $\text{KAlSi}_3\text{O}_8$ ) que é a variedade de feldspato alcalino mais frequente em solos argilosos. Segundo Cordeiro *et al.* (2009c), o alto teor de quartzo presente na cinza é devido à areia aderida à cana-de-açúcar e que é colhida junto à mesma e, mesmo após a lavagem da cana, a areia ainda representa parte da cinza.

A presença de picos de quartzo em amostras de cinzas do bagaço foi comprovada em estudos anteriores como, por exemplo, em Ganesan *et al.* (2007), que estudaram uma cinza do bagaço constituída essencialmente por sílica no estado amorfo, com fases cristalinas referentes ao quartzo e à cristobalita. O mesmo foi antes observado por Martirena Hernández *et al.* (1998) e Cordeiro (2006).

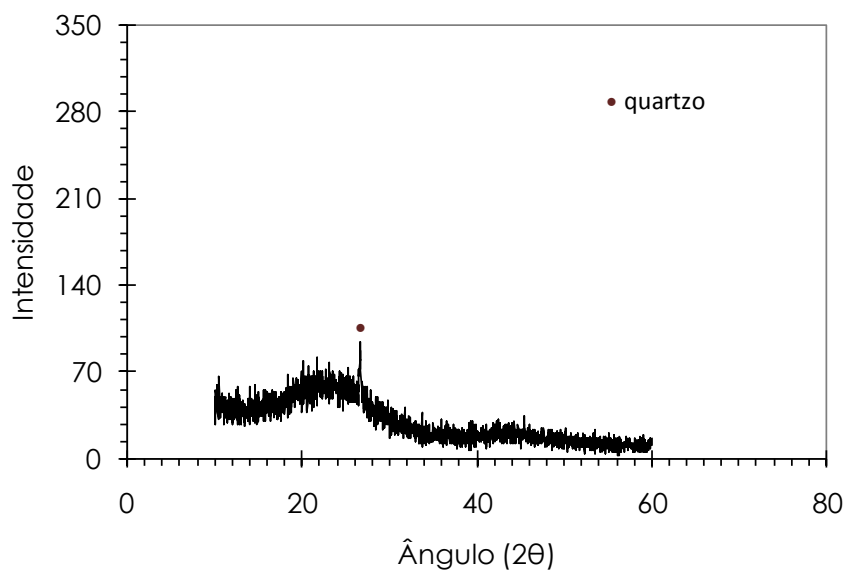


Figura 5.4 – Difratoograma de raios X da CBCA1.

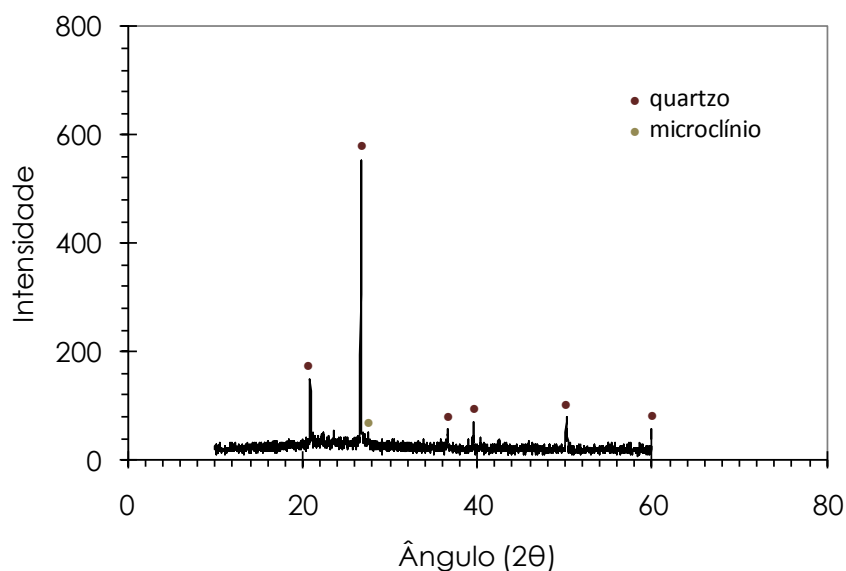


Figura 5.5 – Difratoograma de raios X da CBCA2.

Os difratogramas de raios X das cinzas calcinadas CBCA1-600-3h, CBCA1-600-6h e CBCA1-CER estão indicados nas Figuras 1.5, 1.6 e 1.7, respectivamente. O processo de calcinação a que as cinzas foram submetidas eliminou consideravelmente a matéria orgânica presente nas amostras. De acordo com os difratogramas, as amostras calcinadas apresentaram picos de sílica na forma de quartzo, variando a intensidade do pico de acordo com o tempo. Para as cinzas CBCA1-600-3h e CBCA1-600-6h os picos de quartzo se mantiveram praticamente os mesmos,

porém para a CBCA1–CER os picos foram mais acentuados. Como explicado no estudo de Morales *et al.* (2009), é possível que o tempo prolongado de moagem e a elevada temperatura de queima tenham aumentado o grau de cristalinidade da CBCA1, o que corrobora os resultados de granulometria e de superfície específica (BET). A redução do halo de amorfização das amostras CBCA1-600-3h, CBCA1-600-6h e CBCA1-CER em comparação com a cinza *in natura* é consequência da liberação do carbono durante as queimas.

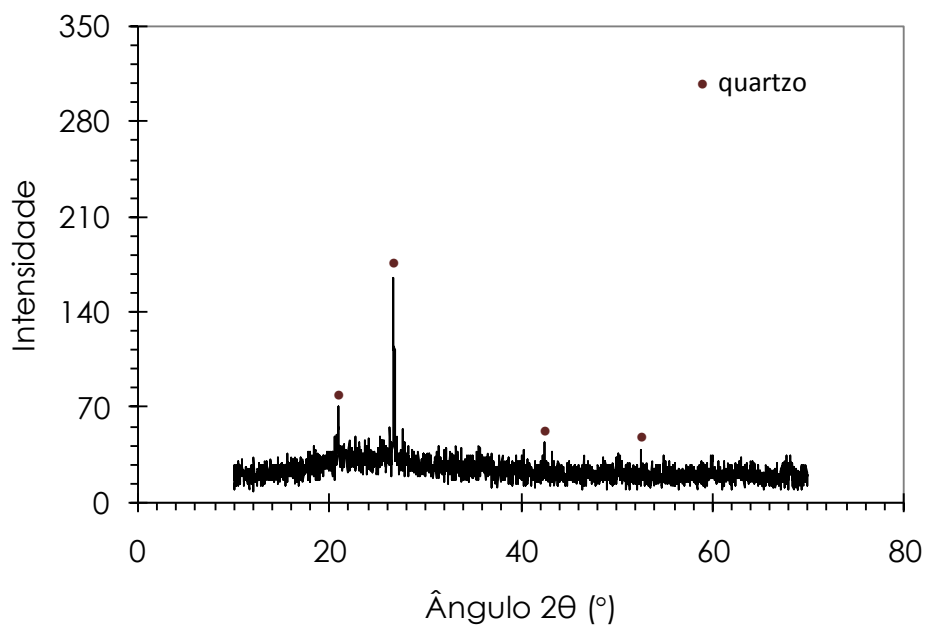


Figura 5.6 - Difratograma de raios X da CBCA1-600-3h.

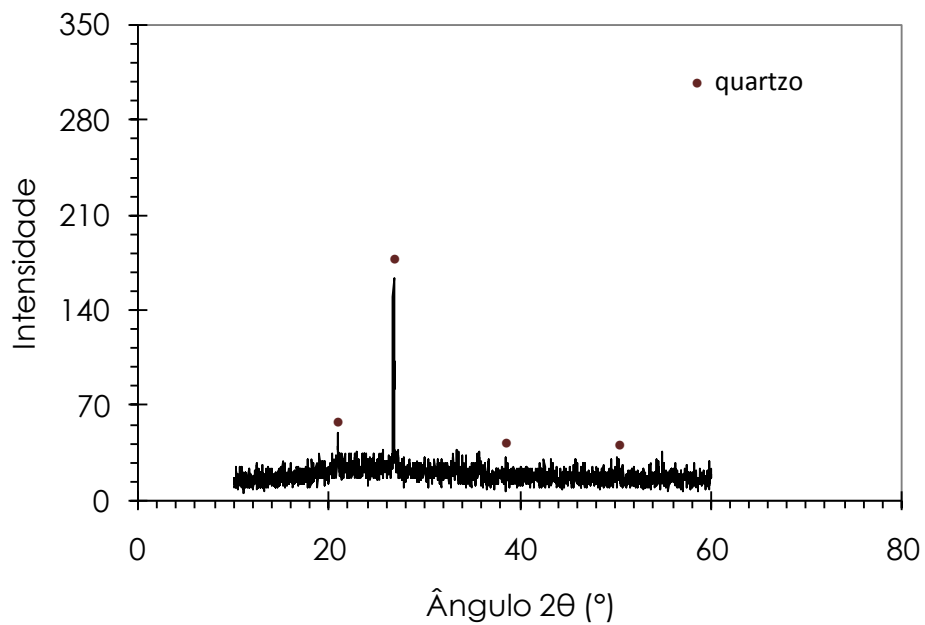


Figura 5.7 - Difratoograma de raios X da CBCA1-600-6h.

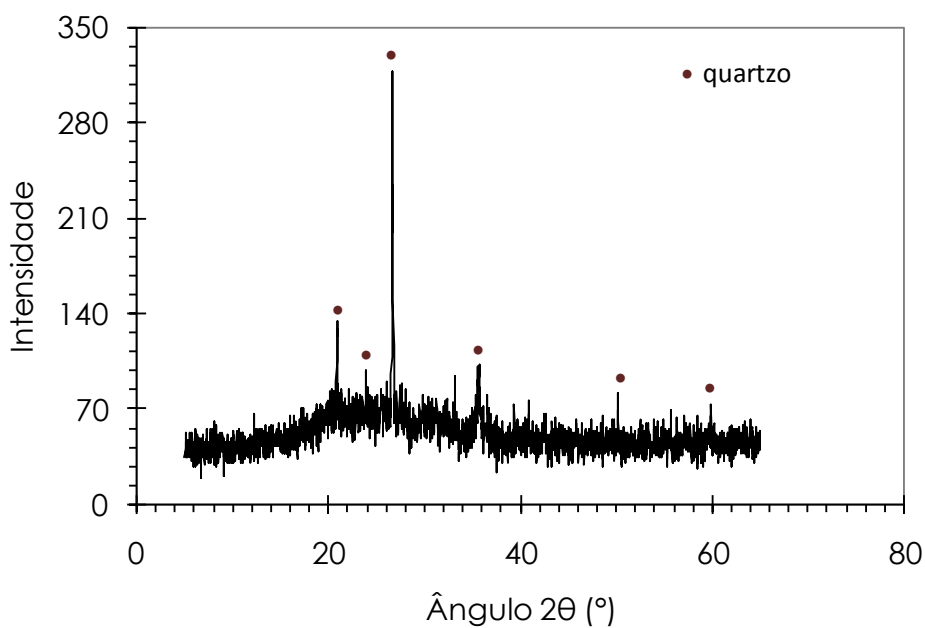


Figura 5.8 - Difratoograma de raios X da CBCA1-CER.

As Figuras 5.8 e 5.9 ilustram os difratogramas das cinzas CBCA2-600-3h e CBCA2-CER, respectivamente. É possível observar que os difratogramas não apresentam grandes variações quando comparados ao da cinza CBCA2, com exceção para os picos de quartzo que foram mais intensos para as cinzas calcinadas pela segunda vez. As razões para isto foram as mesmas apresentadas para a cinzas CBCA1-600-3h, CBCA1-600-6h e CBCA1-CER. A comparação entre as cinzas revela a maior cristalinidade da CBCA2, o que está associado com a maior contaminação com areia da cinza da caldeira em contraste com a cinza coletada nos retentores de fuligem da usina.

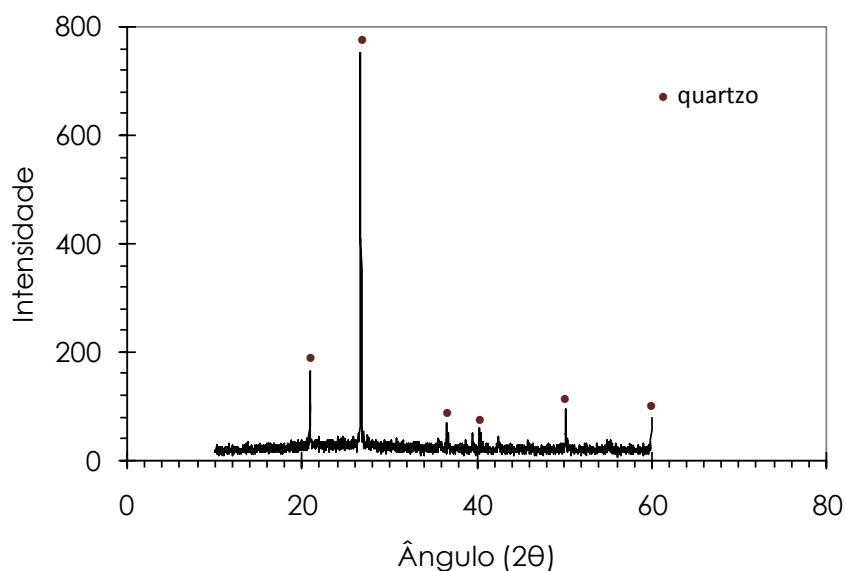


Figura 5.9 – Difratograma de raios X da CBCA2-600-3h.

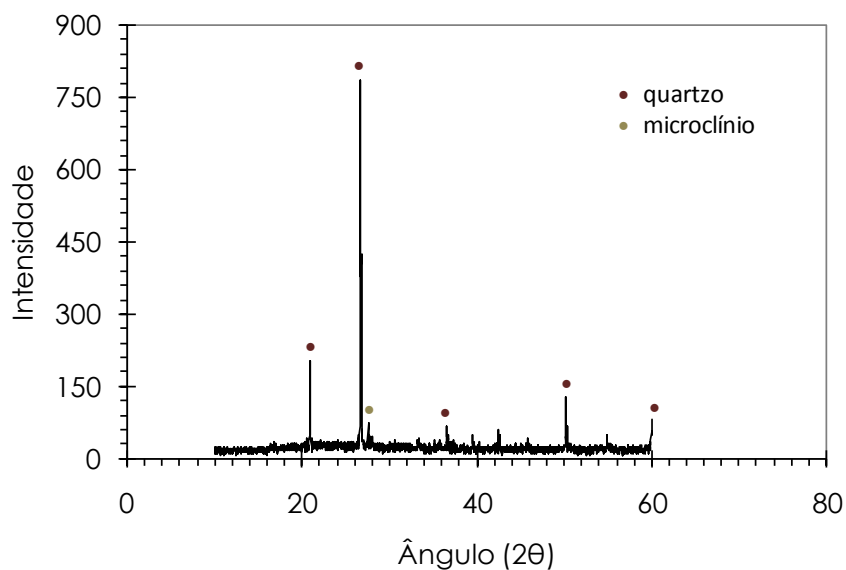


Figura 5.10 – Difratoograma de raios X da CBCA2–CER.

#### 5.4. Atividade pozolânica

O índice de atividade pozolânica com cimento Portland das cinzas estudadas é apresentado na Figura 5.10. É possível observar que as cinzas CBCA1 e CBCA2 não foram classificadas como pozolânicas, isto é, apresentaram valores de índice de atividade inferiores ao mínimo (75%) estabelecido pela NBR 12653 (1992), apesar da granulometria ultrafina e da superfície específica das amostras, fatores que influenciam sobremaneira o índice de atividade pozolânica (CORDEIRO *et al.*, 2008). O fato da não pozolanicidade pode ser justificado pela composição química inadequada mostrada anteriormente, uma vez que ambas apresentaram baixa concentração de sílica e alta perda ao fogo. A Figura 5.10 também mostra que, todas as cinzas calcinadas foram classificadas como pozolânicas, com destaque para a CBCA1-600-6h e CBCA1-CER que alcançaram índices de 102 e 98%, respectivamente. Esses resultados favoráveis apresentados pelas cinzas calcinadas são função dos valores obtidos na composição química (alta concentração de sílica e baixo teor de carbono) e das granulometrias ultrafinas das cinzas. De acordo com Cordeiro *et al.* (2009), o índice de atividade pozolânica aumenta com a temperatura de calcinação devido a remoção do carbono. Entretanto, os

autores ressaltam que a queima em temperatura acima de 800°C possibilita a formação de compostos cristalinos. Os resultados também estão de acordo com Freitas (2005), onde as cinzas apresentaram atividade pozolânica após um processo de calcinação adicional e moagem.

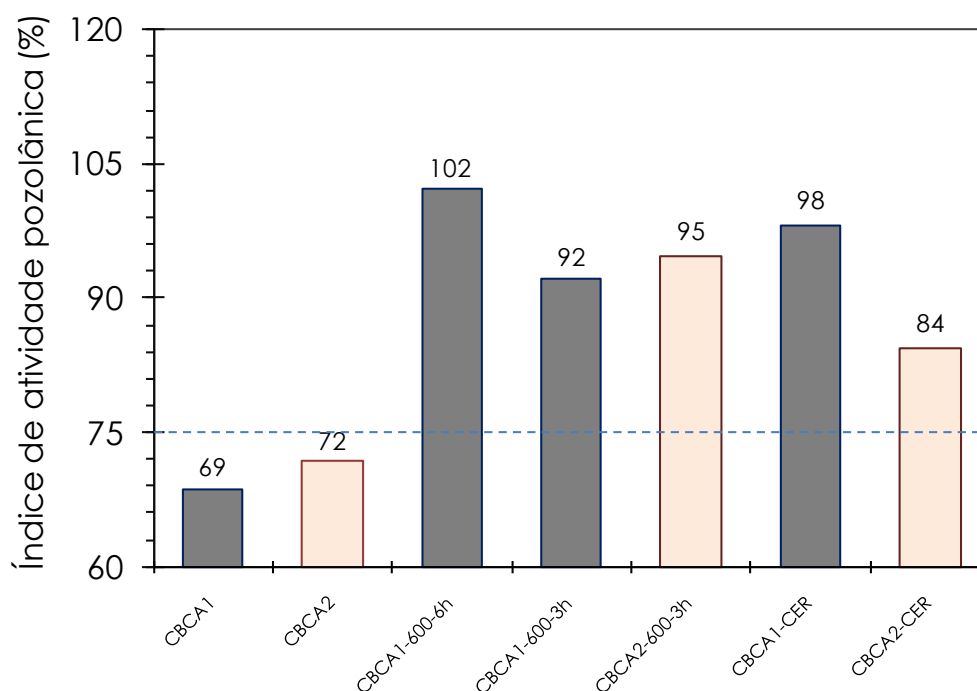


Figura 5.11 - Índice de atividade pozolânica das cinzas.

O segundo método utilizado para a avaliação da atividade pozolânica das cinzas foi o Chappelle modificado, onde Raverdy *et al.* (1980) estipularam o mínimo consumo de óxido de cálcio em 330 mg/g para a classificação do material como pozolânico. A Figura 5.12 apresenta a atividade química das cinzas, onde pode-se observar que apenas cinzas CBCA1 e CBCA2 apresentaram um consumo de CaO abaixo do mínimo estabelecido e a CBCA2-600-3h mostrou o maior consumo (573 mg/g). Além disso, observa-se que entre as cinzas calcinadas, as provenientes da CBCA1 obtiveram um consumo maior de hidróxido. Diversos fatores contribuíram para estes resultados, entre eles a granulometria ultrafina das partículas, alta superfície específica e a composição química com alto percentual de sílica e baixa perda ao fogo das cinzas calcinadas. Entre as

principais razões da reduzida reatividade química nas cinzas provenientes da CBCA2, em comparação das provenientes da CBCA1, está a presença de quartzo nas cinzas, que pode ser verificada nos ensaios de difração de raios X. Esses resultados estão de acordo com o estudo feito por Cordeiro *et al.* (2009) para uma cinza do bagaço queimada a 600°C por 3 h, que apresentou um consumo de 421 mg/g.

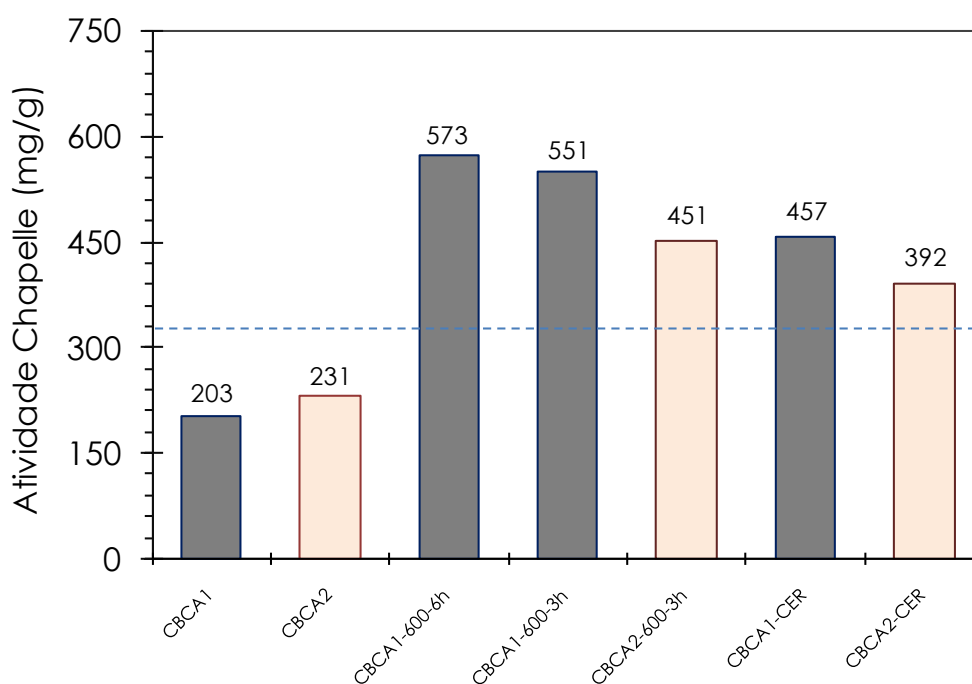


Figura 5.12 - Valores de atividade pozolânica das cinzas (método Chapelle modificado).

O método de condutividade elétrica, proposta por Lúxan *et al.* (1989) foi o terceiro procedimento utilizado para a determinação da atividade pozolânica das cinzas. A Figura 5.7 mostra o decréscimo da condutividade elétrica das cinzas ao longo de 20 min de ensaio. Segundo Rodrigues (2008), esse decaimento pode ser atribuído à formação de produtos insolúveis e ao decréscimo da concentração de hidróxido de cálcio (CH) na solução o que, conseqüentemente, diminui a condutividade elétrica. A cinza CBCA2-CER apresentou a menor queda, enquanto que a CBCA2 apresentou a maior queda de condutividade elétrica no tempo analisado. Segundo pesquisadores como Villar-Cociña *et al.* (2003) e Morales *et al.* (2007), a queda de condutividade elétrica nas idades iniciais é um fator positivo, pois indica que a pozolana está reagindo com o CH, conseqüentemente mais reativo é o material. Kieling (2009) ao estudar a



condutividade elétrica de cinza volante, sílica ativa e cinza da casca do arroz, observou que fatores como finura, teor de sílica, superfície específica e amorfização do material interferem diretamente na reatividade do material.

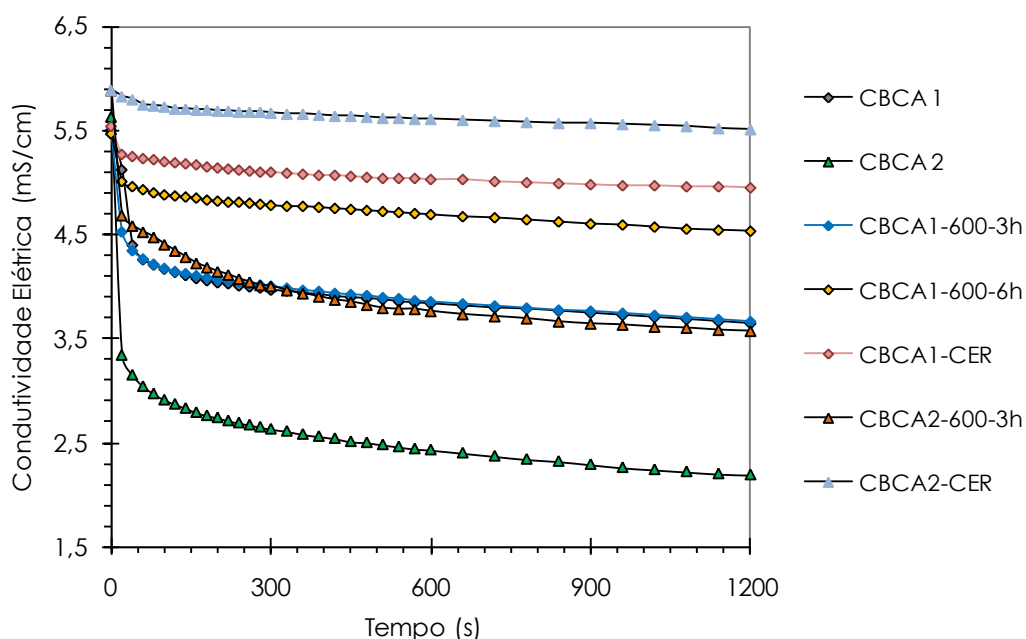


Figura 5.13 - Variação da condutividade elétrica com o tempo das cinzas.

A Figura 5.8 mostra a variação da condutividade elétrica até 2 min, calculada para todas as cinzas e sua classificação de acordo com Lúxan *et al.* (1988). É possível observar que todas as cinzas produzidas na cerâmica, CBCA1-CER, CBCA2-CER, foram classificadas como não pozolânicas, pois apresentaram variação de condutividade elétrica inferior a 0,4 mS/cm. A cinza que apresentou a maior pozolanicidade (superior a 1,2 mS/cm) foi a CBCA2, que alcançou uma variação de condutividade igual 2,7mS/cm, seguida CBCA2-600-3h, CBCA1 e CBCA1-600-3h. A única cinza classificada como mediamente pozolânica foi a CBCA1-600-6h com variação de condutividade elétrica entre 0,4 e 1,2 mS/cm, igual a 0,66 mS/cm. Esses resultados estão coerentes aos estudados por Soares (2010), para cinzas do bagaço com elevado teor de carbono que passaram por processos de moagem e queimas controladas.

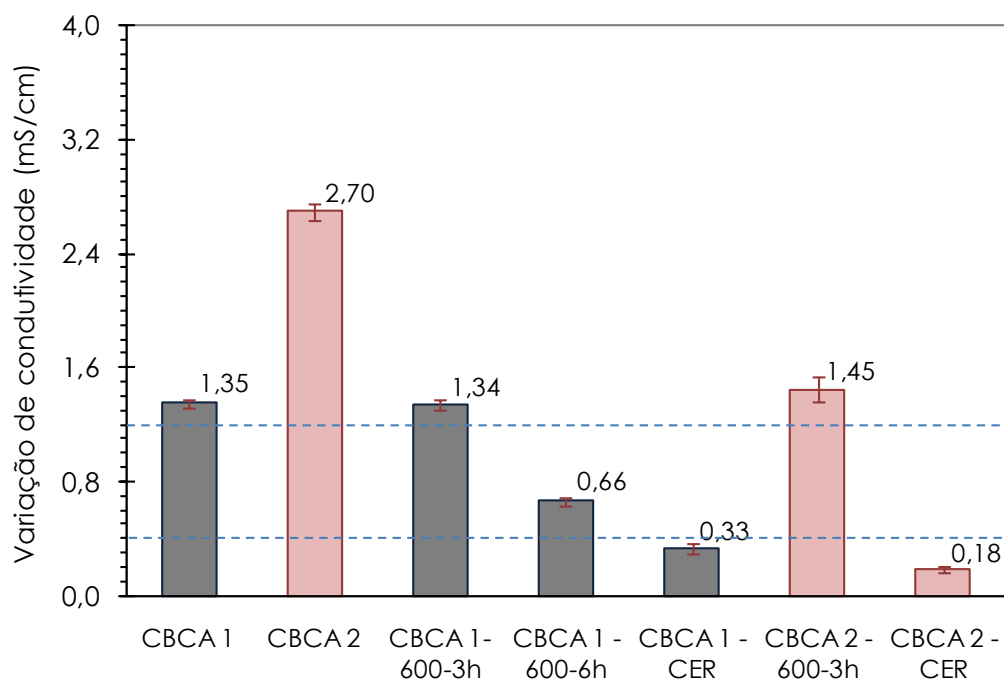


Figura 5.14 - Variação de condutividade elétrica das cinzas após 2 minutos.

A Figura 5.14 ilustra a comparação entre os resultados obtidos pelos métodos de índice de atividade pozolânica e de Chapelle modificado, onde pode-se observar que os dois métodos apresentaram boa correlação para uma ajuste linear ( $R^2=88\%$ ). Neste caso, as cinzas provenientes da calcinação da CBCA1 apresentam maior pozolanicidade, com destaque para a CBCA1-600-6h. A CBCA 1 apresentou-se como predominantemente amorfa e com o menor tamanho médio de partículas, porém com alta concentração de carbono (82,2%), sendo classificada como não pozolânica em ambos os métodos. Porém, após a calcinação, apesar do tamanho médio ter aumentado um pouco em relação à CBCA1, a perda ao fogo diminuiu bruscamente e a concentração de sílica cresceu consideravelmente, o que possibilitou que todas as cinzas pudessem ser classificadas como pozolanas.

A cinza CBCA2 foi classificada como não pozolânica em ambos os métodos, apesar da finura ( $D_{50}$  igual a  $4,7 \mu\text{m}$ ), principalmente por ser um material cristalino e pela alta perda ao fogo (20,9%). A CBCA2-600-3h e

CBCA2–CER foram classificadas como pozolônicas nos dois métodos, apesar da presença de fases cristalinas. A boa classificação destas se deve a elevada concentração de sílica na composição química e a granulometria ultrafina.

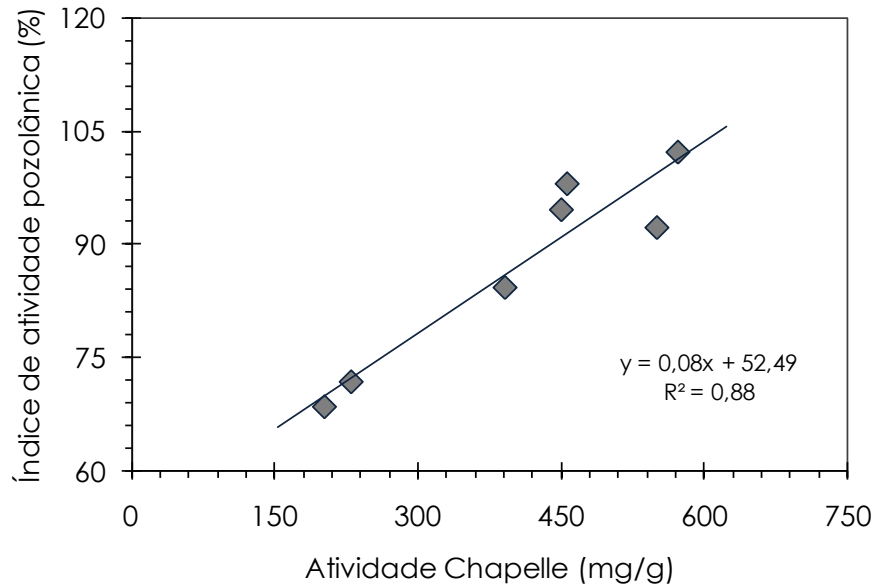


Figura 5.15 - Correlação entre os ensaios de índice de atividade pozolônica (%) e Chapelle (mg/g).

A Figura 5.15 correlaciona os métodos de índice de atividade pozolônica (%) e de condutividade elétrica, em que o coeficiente de correlação para uma ajuste linear foi baixo ( $R^2=26\%$ ). Pelo método de índice de atividade pozolônica todas as cinzas calcinadas provenientes da CBCA1 e CBCA2 foram classificadas como pozolanas, porém pelo método de condutividade elétrica a cinza mais pozolânica foi a CBCA2. Além disto, o resultado CBCA1 apresentou-se entre os melhores.

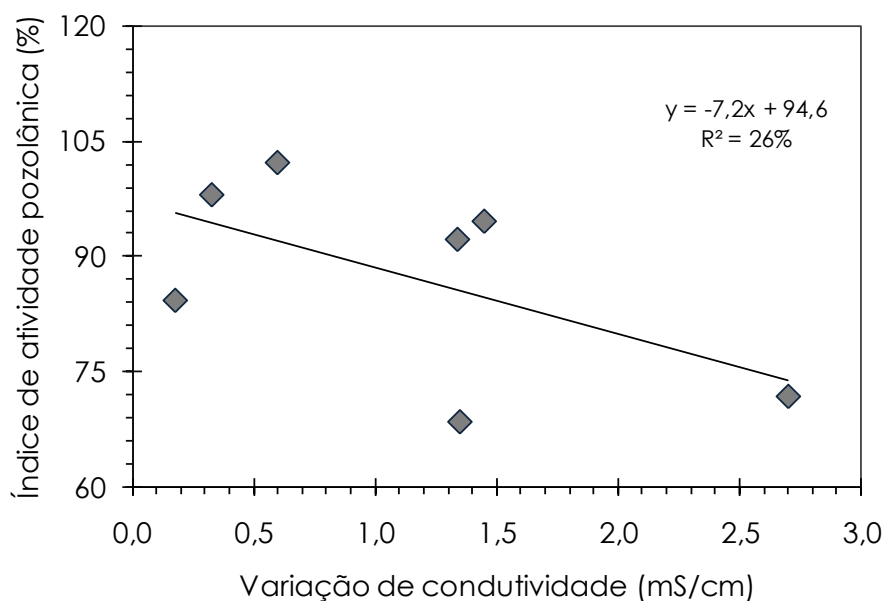


Figura 5.16 - Correlação entre os métodos de índice de atividade pozolânica (%) e condutividade elétrica (mS/cm).

O gráfico (Figura 5.16) de correlação linear entre os métodos de atividade Chapelle (mg/g) e de condutividade elétrica (mS/cm) também mostra um baixo ajuste linear ( $R^2=27\%$ ). Pelo método de Chapelle modificado apenas as cinzas CBCA1 e CBCA2 apresentaram um consumo de CaO abaixo do mínimo estabelecido (330mg/g) para serem classificadas como cinzas pozolânicas. Enquanto que os resultados de condutividade elétrica mostraram estas cinzas como altamente pozolânicas. Outro destaque se deu para as cinzas calcinadas na cerâmica: CBCA1-CER e CBCA2-CER. Ambas foram classificadas como pozolânicas pelo método de Chapelle e pelo método de condutividade elétrica apresentaram a menor variação de condutividade elétrica, sendo classificadas como não pozolânicas.

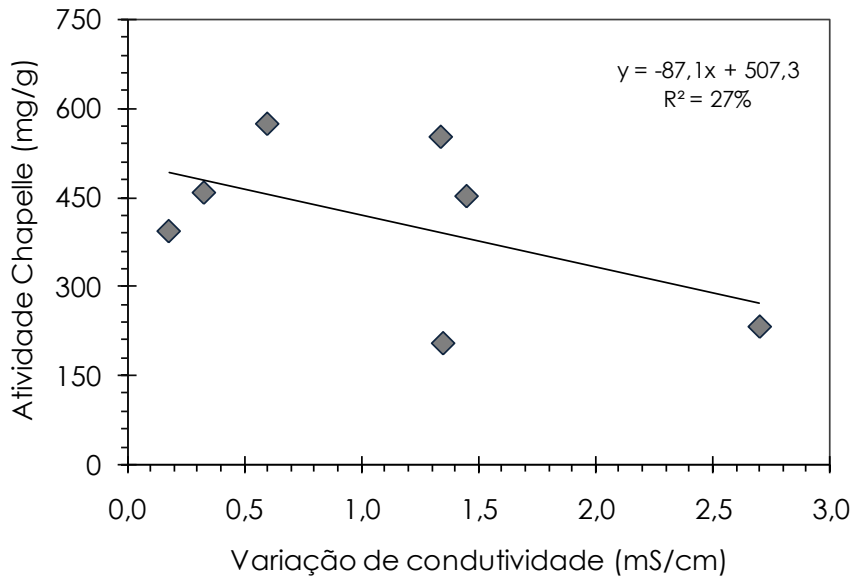


Figura 5.17 - Correlação entre os métodos de Chapelle (mg/g) e condutividade elétrica (mS/cm).

A não correlação obtida pelo ensaio de condutividade elétrica em relação aos outros dois métodos: índice de atividade pozolânica e Chapelle modificado pode ser explicado por Rodrigues (2004), que enfatiza que o decréscimo de condutividade elétrica pode não refletir realmente o grau de atividade pozolânica do material. Isto se deve à ocorrência, em alguns casos, da nucleação, onde os íons  $\text{Ca}^{2+}$  são atraídos pela superfície das partículas, sem acontecer, necessariamente a reação entre estes íons e a sílica amorfa. Este comportamento pode ter ocorrido para as cinzas residuais, que contêm elevados teores de carbono em sua composição química, principalmente a CBCA1. Assim, o decréscimo de condutividade elétrica acaba sendo mais em função da área de superfície específica das partículas do que do teor de sílica e da quantidade de sua fase ativa.

## 5.5. Influência da substituição de cimento Portland por CBCA na resistência à compressão de argamassas.

A Figura 5.17 ilustra os valores de resistência à compressão obtidos para a argamassa de referência e para as argamassas com diferentes teores de substituição parcial de cimento Portland por CBCA1. Os resultados mostraram que a argamassa de referência alcançou 46,2 MPa de resistência à compressão após 28 dias de cura à 40°C. Estatisticamente, pela análise de variância seguida de teste de média (teste de Duncan) com 5% de probabilidade ( $p < 0,05$ ), para o teor de 15% de CBCA1 não houve diferença significativa em relação à argamassa de referência. Porém, a substituição de cimento pela cinza acarretou redução na resistência à compressão para os demais teores. Além disso, estatisticamente não houve diferença significativa entre os valores de resistência a compressão para os teores de 25 e 30% (que apresentaram uma redução de aproximadamente 21% em relação à referência) e 15 e 10% (redução de aproximadamente 6% em relação à referência).

Os resultados obtidos pela substituição de cimento Portland pela cinza CBCA1 mostraram uma tendência de queda da resistência associada ao teor crescente de cinza, fato esperado com a não pozolanicidade da cinza e ao analisar a composição química do material, que contém predominantemente carbono.

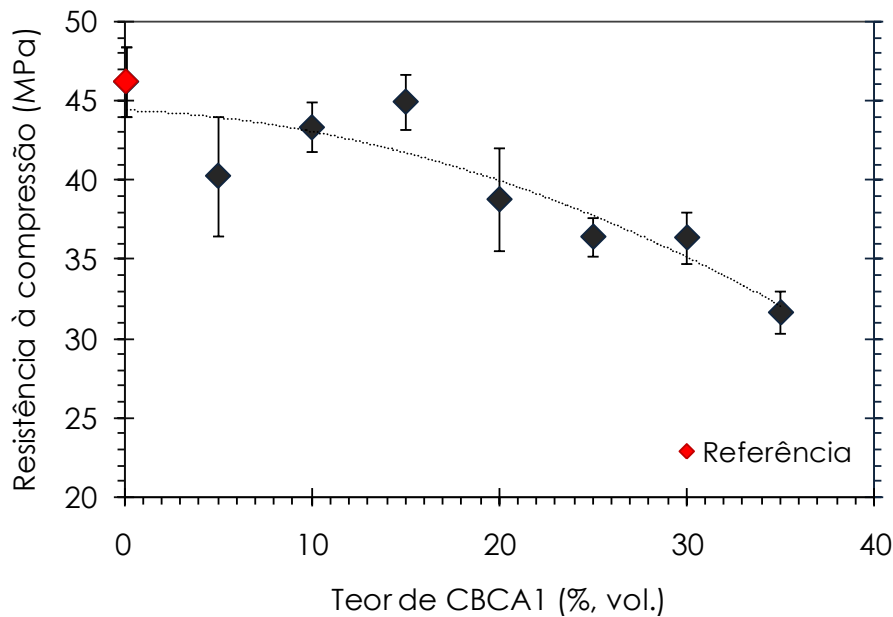


Figura 5.18 - Resistência à compressão das argamassas confeccionadas com substituição parcial de cimento por CBCA1.

Os valores de resistência à compressão das argamassas com substituição parcial de cimento Portland por CBCA2 estão mostrados na Figura 5.19. Pelas análises estáticas ( $p < 0,05$ ), os valores das resistências à compressão das argamassas com 20 e 25% de substituição não apresentaram diferenças significativas em relação à de referência. Estes resultados não eram esperados, tendo em vista a não pozolanicidade apresentada pela cinza. No entanto, as argamassas com 5, 10 e 15% também apresentaram valores similares, alcançando 88% da resistência da referência. As argamassas com teores de 30 e 35% de substituição apresentaram as maiores diferenças em comparação com a referência, (cerca de 77 e 72%, respectivamente) como era esperado de acordo com a baixa reatividade da cinza, caráter cristalino apresentado no estudo difração de raios X e baixo percentual de sílica na composição química.

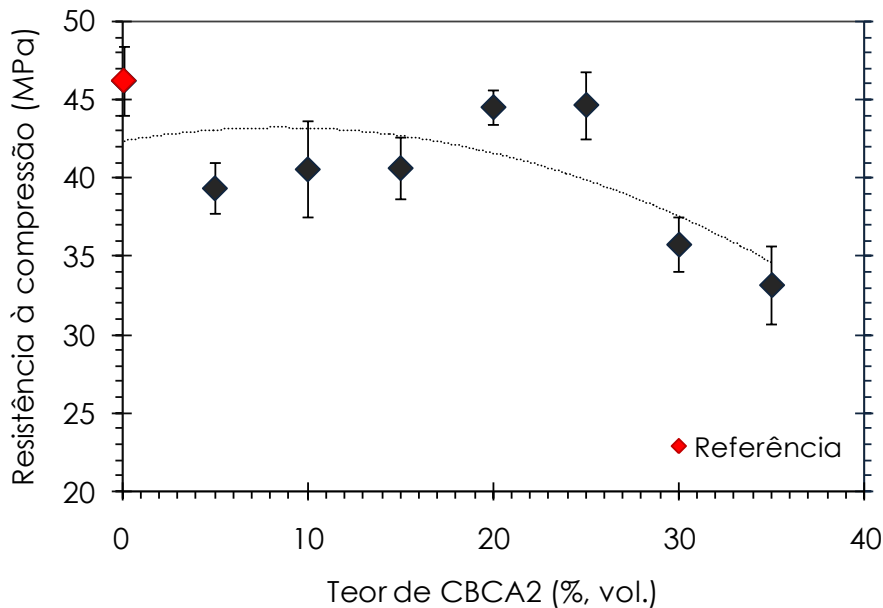


Figura 5.19 - Resistência a compressão das argamassas confeccionadas com substituição parcial de cimento por CBCA2.

Os resultados mostraram que as argamassas com substituições de cimento Portland pelas cinzas CBCA1 e CBCA2 apresentaram quedas das resistências à compressão a partir dos teores de 15 e 25%, respectivamente. Este efeito pode estar associado a um mecanismo que compensa a menor quantidade de cimento na mistura. Estudo produzido por Cordeiro *et al.* (2008) mostrou que uma cinza do bagaço com alto teor de quartzo (contaminação) e, conseqüentemente, reduzida reatividade, acarretou aumento de resistência em argamassas devido ao seu efeito fíler pronunciado. Comportamento semelhante foi observado para outros materiais como sílica ativa (BENTUR e GOLDMAN, 1994) e quartzo ultrafino (BENEZET e BENHASSAINE, 1999).

O estudo das argamassas confeccionadas com substituição de cimento pelas cinzas provenientes da calcinação da CBCA1 (CBCA1-600-3h, CBCA1-600-6h e CBCA1-CER) está ilustrado nas Figuras 5.20 e 5.21. Para a cinza CBCA1-600-3h, o ensaio foi feito apenas para o teor de substituição de 35%, que alcançou aproximadamente 90% da resistência da argamassa de referência que, estatisticamente, pelo teste de médias de Duncan com 5% de significância, não apresentou diferença significativa em relação os teores de 5 e 30% de substituição pela cinza CBCA1-600-6h.



Além disto, as argamassas de referência e com de 35% de CBCA1-600-6h também não apresentaram diferenças significativas entre si. Entre as demais argamassas, as únicas que apresentaram diferenças, estatisticamente, foram as com 30 e 15% de substituição (decréscimo de aproximadamente 5%). Esses resultados mostraram que a variação no teor de cinza teve pouca influência na resistência à compressão das argamassas confeccionadas com a CBCA1-600-6h. No entanto, os resultados de resistência à compressão com esta cinza foram melhores quando comparados aos da cinza CBCA1, isso porque a calcinação gerou um material com alta atividade pozolânica e concentração de sílica 6 vezes maior do que da cinza CBCA1.

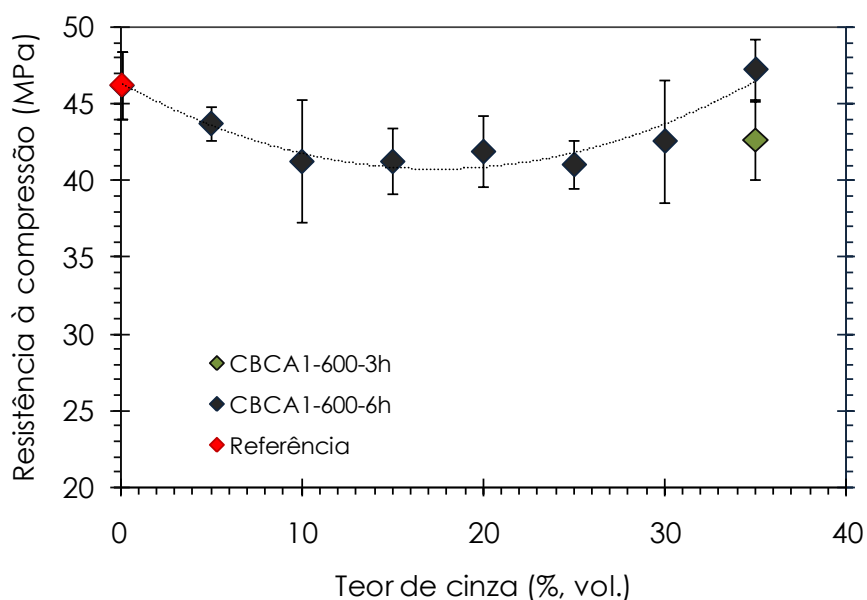


Figura 5.20 - Resistência a compressão das argamassas confeccionadas com substituição parcial de cimento por CBCA1-600-3h e CBCA1-600-6h.

A Figura 5.21 mostra os resultados das argamassas confeccionadas com a cinza CBCA1-CER. Estatisticamente, pelo teste de Duncan ( $p < 0,05$ ), as argamassas com teores de 5, 10, 15, 20 e 35% não apresentaram diferenças significativas entre si e em relação à referência. O mesmo aconteceu para os teores de 5, 25 e 30% (que apresentaram aproximadamente 103% da resistência da referência). Esses resultados

favoráveis apresentados pelas argamassas com a cinza CBCA1-CER são consequências da atividade pozolânica e da composição química do material.

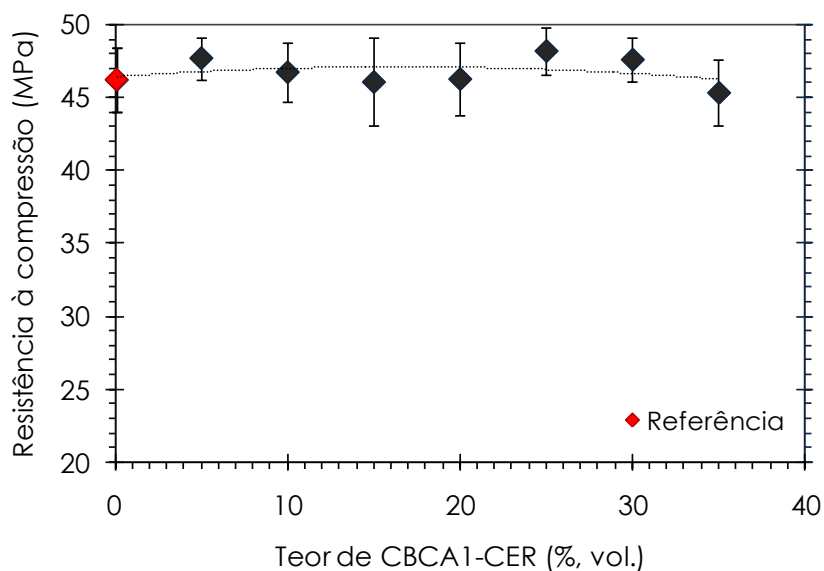


Figura 5.21 - Resistência a compressão das argamassas confeccionadas com substituição parcial de cimento por CBCA1-CER.

Os resultados de resistência à compressão das argamassas confeccionadas com as cinzas resultantes da calcinação da CBCA2 (CBCA2-600-3h e CBCA2-CER) estão ilustrados nas Figuras 5.22 e 5.23 (respectivamente). Na Figura 5.22 os resultados mostraram, pelo teste de Duncan ( $p < 0,05$ ), que o teor de 5% de substituição de cimento pela cinza CBCA2-600-3h não apresentou diferença significativa em relação aos teores de 15 e 35%. O mesmo foi constatado para os teores de 25 e 30% e 25 e 35% de substituição pela cinza, que alcançaram 93 e 95% em relação à referência, respectivamente.

Na Figura 5.23 é possível observar que os valores de resistência à compressão para as argamassas com 5, 10, 15 e 20% não apresentaram diferenças significativas entre si, com redução de cerca de 9% da resistência obtida para a argamassa de referência. A mesma tendência de

comportamento foi observada para os teores de 30 e 35% DE CBCA2-CER, porém com redução de aproximadamente 15% quando comparada a resistência da argamassa de referência.

Os resultados das resistências à compressão apresentados pelas cinzas calcinadas CBCA2-600-3h e CBCA2-CER, em comparação a cinza CBCA2, foram favoráveis devido a fatores como atividade pozolânica e teor de sílica das cinzas calcinadas.

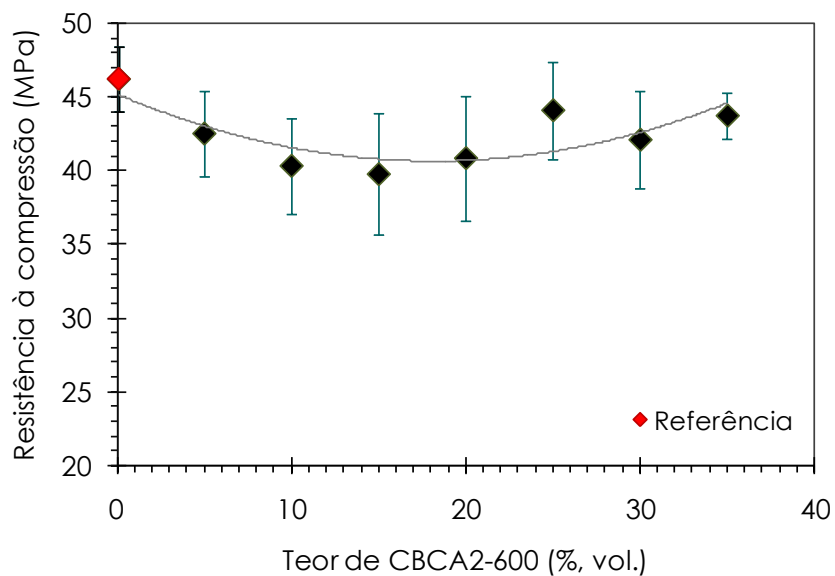


Figura 5.22- Resistência a compressão das argamassas confeccionadas com substituição parcial de cimento por CBCA2-600-3h.

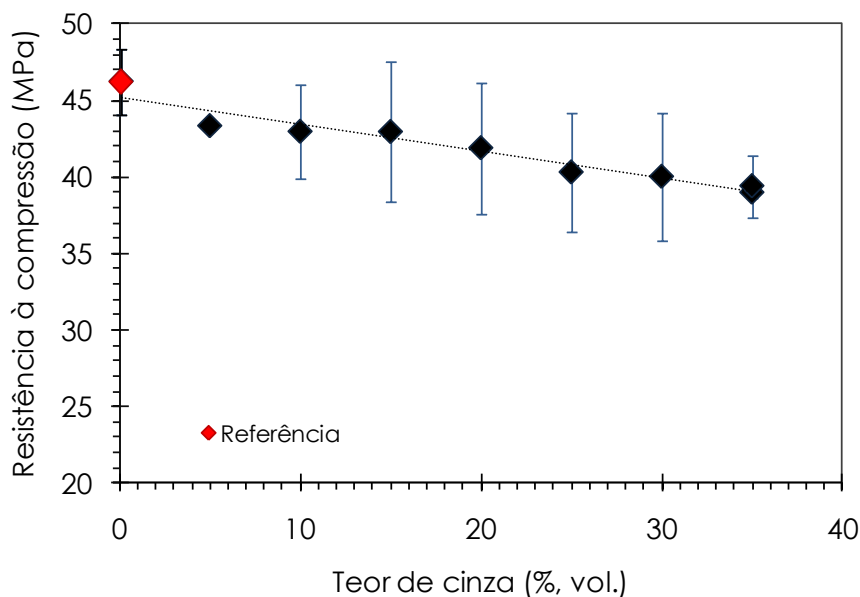


Figura 5.23 - Resistência a compressão das argamassas confeccionadas com substituição parcial de cimento por CBCA2-CER.

Após análise das argamassas produzidas com substituição de cimento Portland pelas cinzas calcinadas é possível observar que, em geral, as cinzas provenientes da cinza CBCA1 obtiveram resultados melhores de resistência a compressão em relação às cinzas provenientes da calcinação da CBCA2. De acordo com estudos de Payá *et al.* (2002), Ganesan *et al.* (2007) e Cordeiro *et al.* (2009a) este fato se deve, principalmente, à composição química favorável destas cinzas, principalmente no que se refere à baixa perda ao fogo e ao alto percentual de sílica. Além disto, os resultados de índice de atividade pozolânica e de Chapelle modificado mostraram as cinzas calcinadas como pozolânicas. Sendo assim, as reações pozolânicas aliadas à granulometria ultrafina das cinzas provavelmente foram responsáveis por esses resultados favoráveis de resistência à compressão das cinzas calcinadas.

## 5.6. Seleção das cinzas para emprego em concreto

A partir da caracterização das cinzas sob diversos aspectos como composição química, granulometria, superfície específica, difração de raios X, atividade pozolânica e resistência à compressão de argamassas confeccionadas com as diferentes cinzas do bagaço, foram selecionadas 3 destas para a produção de concretos.

Os resultados da caracterização e do estudo de argamassas mostraram que a cinza CBCA2, quando comparada com a CBCA1, apresentou fatores favoráveis como: melhores valores de resistência à compressão das argamassas, maior percentual de sílica e menor perda ao fogo. Porém, após as queimas em laboratório e em cerâmica, tanto as cinzas provenientes da CBCA1 (CBCA1-600-6h e CBCA1-CER) quanto às oriundas da CBCA2 (CBCA2-600-3h e CBCA2-CER) apresentaram resultados satisfatórios nos estudos de atividade pozolânica, percentual de sílica no material, baixa perda ao fogo, alta superfície específica e resistência à compressão em argamassas. Desta forma, ambas as cinzas calcinadas poderiam ser selecionadas para a confecção dos concretos, mas, tendo em vista o rendimento do material nos fornos, optou-se pelas provenientes da CBCA2.

O teor de substituição de cimento por cinza nos concretos foi escolhido em função do estudo das argamassas (item 5.5.1). De acordo com a Figura 5.25 é possível observar que a resistência à compressão das argamassas com as cinzas apresentaram, em geral, uma tendência de resistência à compressão constante até o teor de 20% de substituição. A partir deste teor houve uma maior variação nos valores de resistência à compressão das argamassas. Sendo assim, foi escolhido o teor de 20% para a substituição de cimento pelas cinzas CBCA2, CBCA2-600-3h e CBCA2-CER para a confecção dos concretos. Além disto, este teor está de acordo com outras pesquisas de concreto com cinzas do bagaço, de autores como Ganesan *et al.* (2007), Cordeiro *et al.* (2008) e Chusilp *et al.* (2009).

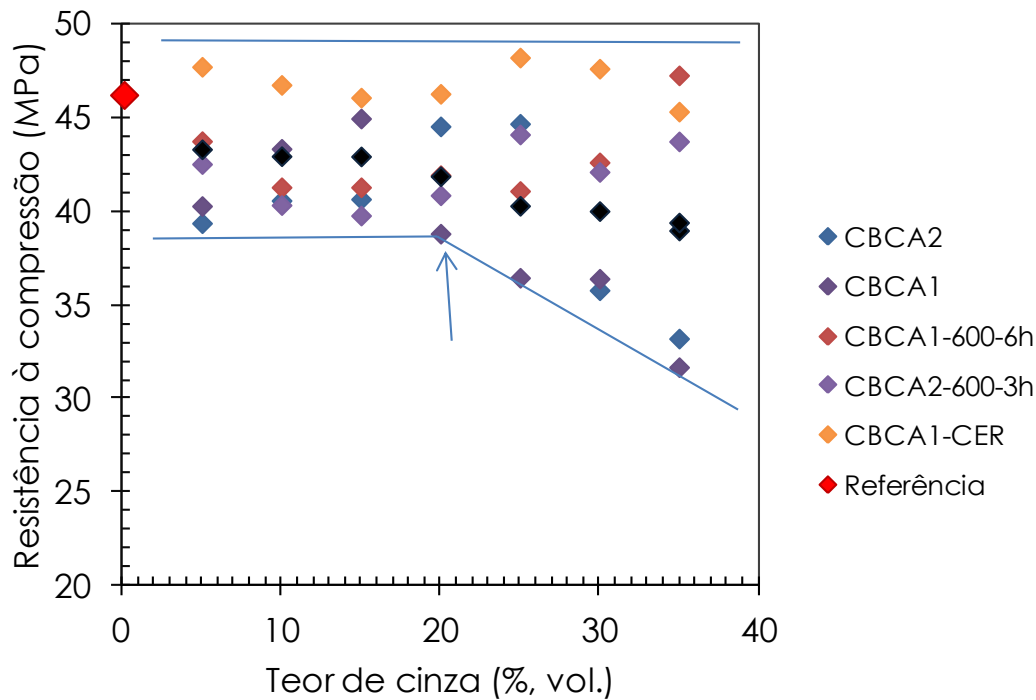


Figura 5.24 - Resistência à compressão das argamassas com as cinzas de bagaço para os diferentes teores de substituição de cimento.

## 5.7. Aplicação das cinzas do bagaço de cana-de-açúcar em um concreto de 40 MPa de resistência à compressão.

### 5.7.1. Influência da substituição de cimento por cinzas do bagaço nos valores de índices físicos do concreto

A influência da substituição de cimento pelas cinzas do bagaço nos valores de índice de vazios, absorção e massa específica é apresentada neste item. A Figura 5.26 ilustra os resultados de índice de vazios (%) para cada um dos quatro concretos confeccionados, onde é possível observar que não houve diferença significativa ao nível de 5% de probabilidade entre os valores médios de índice de vazios dos concretos de referência e com a cinza CBCA2-CER. O mesmo comportamento foi observado para os concretos confeccionados com as cinzas CBCA2 e CBCA2-600-3h, que apresentaram, em média, uma redução no índice de vazios de cerca de 18%, em comparação ao concreto de referência.

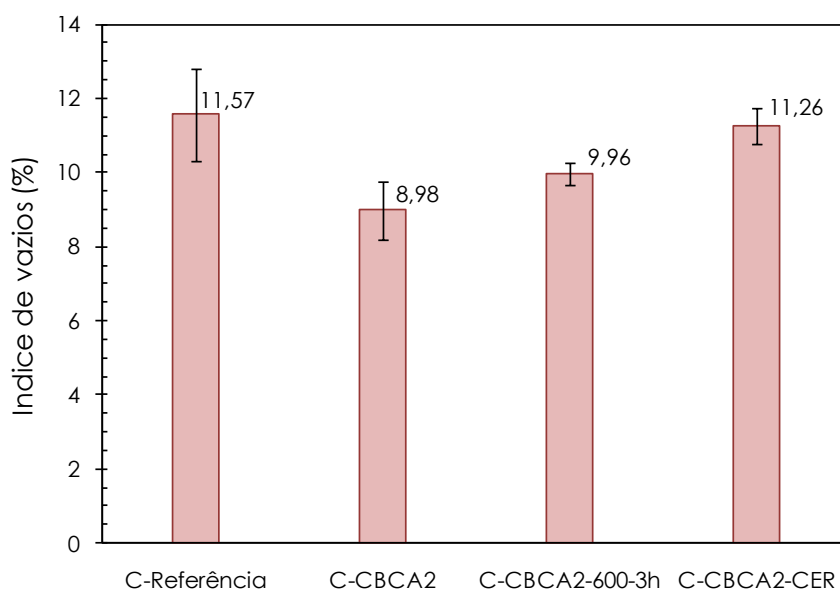


Figura 5.25 – Valores de índice de vazios (%) dos concretos confeccionados.

Na Figura 5.27 estão mostrados os valores do ensaio de absorção de água nos concretos. Estatisticamente, pela análise de variância ao nível de significância de 5% de probabilidade, o valor da absorção do concreto de referência (5,19%) não apresentou diferença significativa em relação ao concreto confeccionado com a cinza CBCA2-CER. Enquanto que, os concretos C-CBCA2-600-3h e C-CBCA2 apresentaram aproximadamente 16% de redução nos valores de absorção em relação à referência e não apresentaram, estatisticamente, diferenças significativas entre si.

De acordo com os resultados obtidos nos ensaios de índice de vazios e absorção de água, é possível observar que a incorporação de partículas ultrafinas (cinzas) promove um preenchimento dos vazios do concreto, que torna o produto final menos poroso, o que provoca uma redução nestes índices físicos. Este fato está de acordo com estudos desenvolvidos por diversos autores, entre eles, Ganesan *et al.* (2007), Chusilp *et al.* (2009) e Sales *et al.* (2010).

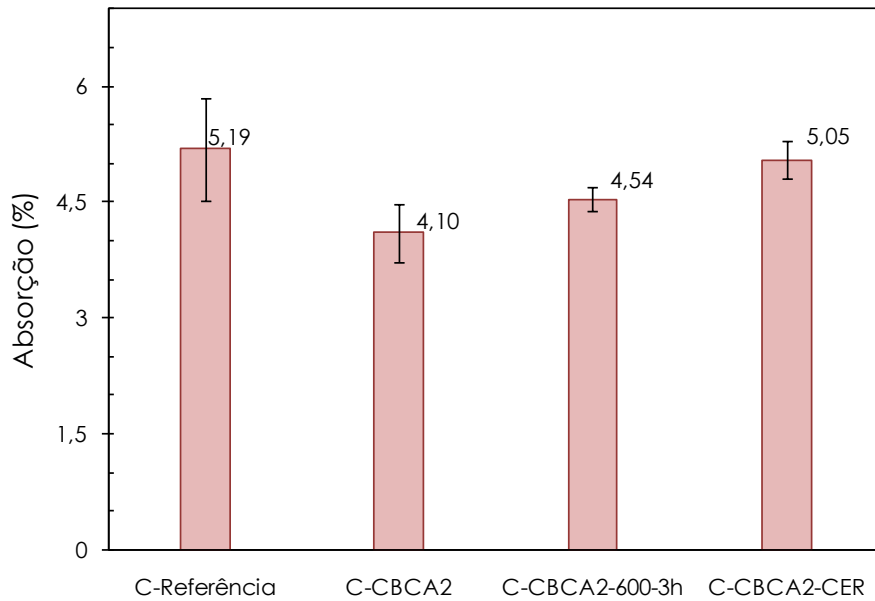


Figura 5.26 – Valores de absorção (%) dos concretos.

A Figura 5.28 mostra os resultados de massa específica dos concretos. De forma similar ao observado para os valores de índice de vazios e de absorção, pelo teste de médias de Duncan ( $p < 0,05$ ) não houve diferenças significativas entre os concretos de referência e com a CBCA2-CER e entre os concretos com as cinzas CBCA2-600-3h e CBCA2, que apresentaram uma redução de 5% em relação ao valor de massa específica da referência. Esta redução pode ser explicada pelo fato de que a substituição do cimento por cinza foi feita em volume equivalente. Assim, como as cinzas apresentaram valores de massas específicas menores do que a do cimento, os concretos com estes materiais apresentaram reduzidos valores de massa específica. Essa mesma tendência pôde ser vista em outros estudos com CBCA (CORDEIRO, 2006; AKRAM *et al.*, 2008; CHUSILP *et al.*, 2009).



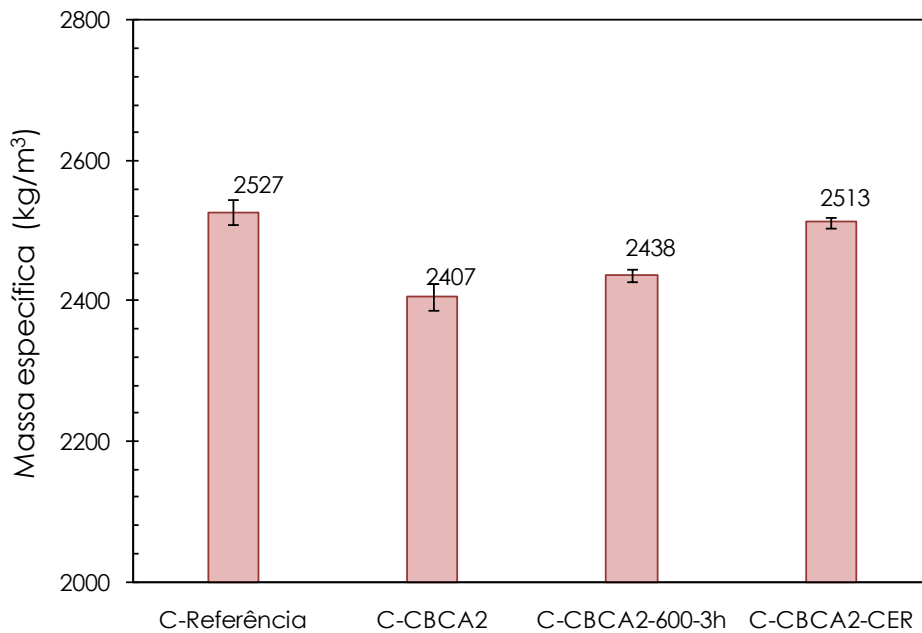


Figura 5.27 – Valores de massa específica (kg/m<sup>3</sup>) dos concretos.

### 5.7.2. Influência da substituição de cimento por cinzas do bagaço nas propriedades mecânicas do concreto

As propriedades mecânicas foram estudadas para as idades de 3, 7, 28 e 180 dias. As curvas tensão-deformação dos concretos estão ilustradas na Figura 5.29 e a Tabela 5.4 mostra os valores de resistência à compressão, de módulo de elasticidade e de deformação referente à tensão máxima (deformação de pico) de cada concreto após 3 dias de cura. É possível observar um comportamento mecânico inferior dos concretos com as cinzas do bagaço. Enquanto a mistura de referência apresenta uma resistência de 22,5 MPa, os concretos contendo as cinzas mostraram resistência a compressão de 21,3 MPa, 15,8 MPa e 15,4 MPa para os concretos C-CBCA2-600-3h, C-CBCA2-CER e C-CBCA2, respectivamente. Pelo teste de médias de Duncan ( $p < 0,05$ ) os concretos com as CBCA2-CER e CBCA2 não apresentaram diferenças significativas quanto à resistência à compressão.

Ao analisar as deformações dos concretos referentes às tensões máximas, observa-se que o concreto de referência alcançou 2579  $\mu\epsilon$ , e

estatisticamente, a referência e as misturas confeccionadas com as cinzas CBCA2, CBCA2-600-3h e CBCA2-CER não apresentaram diferenças significativas entre si. Em relação ao módulo de elasticidade dos concretos após 3 dias de cura, estatisticamente, o concreto de referência alcançou o valor máximo (22,4 GPa). Os resultados das misturas C-CBCA2-600-3h e C-CBCA2-CER não apresentaram diferenças significativas entre si, com redução de 10% do valor quando comparado à referência. O concreto com a cinza CBCA2 apresentou o menor módulo de elasticidade (17,4 GPa) aos 3 dias.

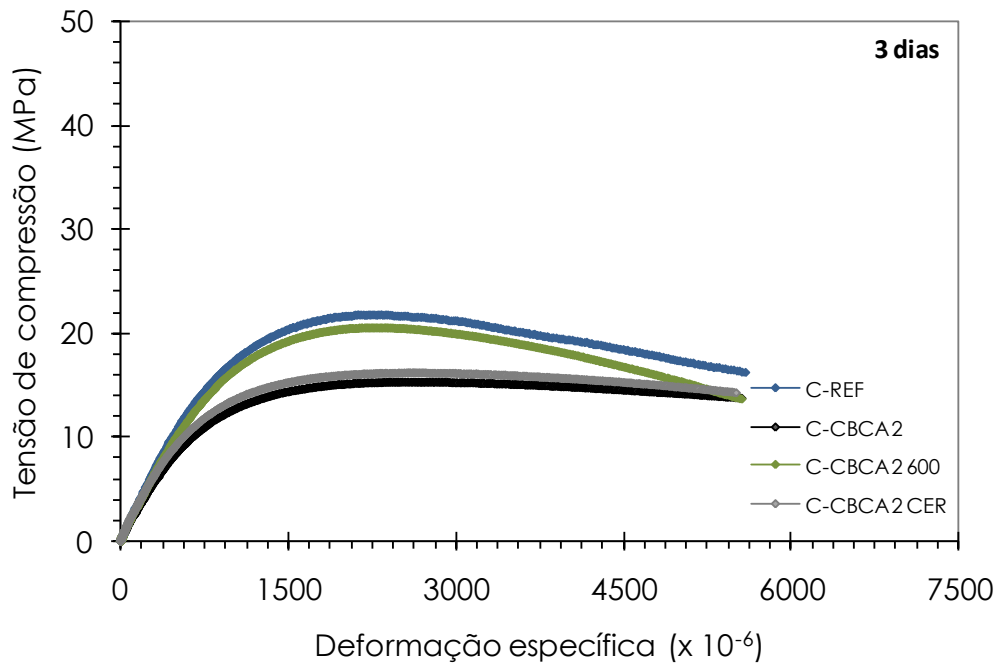


Figura 5.28 - Curvas tensão-deformação dos concretos após 3 dias de cura.

Tabela 5.5 – Valores médios de resistência à compressão, módulo de elasticidade e deformação de pico dos concretos, aos 3 dias, com os respectivos valores de desvio padrão.

Característica	Concretos			
	Referência	CBCA2	CBCA2-600-3h	CBCA2-CER
Resistência à compressão (MPa)	22,5 ( $\pm 0,85$ )	15,4 ( $\pm 0,23$ )	21,3 ( $\pm 1,02$ )	15,8 ( $\pm 0,42$ )
Módulo de elasticidade (GPa)	22,4 ( $\pm 0,59$ )	17,4 ( $\pm 0,67$ )	20,0 ( $\pm 0,28$ )	19,9 ( $\pm 1,13$ )
Deformação de pico ( $\mu\epsilon$ )	2579 ( $\pm 342$ )	2629 ( $\pm 217$ )	2445 ( $\pm 243$ )	2482 ( $\pm 168$ )

A Figura 5.30 ilustra as curvas tensão-deformação dos concretos, após 7 dias de cura, onde é possível observar que, estatisticamente, a resistência mecânica dos concretos de referência (28,5 MPa) e o C-CBCA2-600-3h (29,9 MPa) não apresentaram diferenças significativas entre si, ao nível de 5% de probabilidade. De forma similar, o concreto C-CBCA2 (26,9 MPa) não apresentou diferença significativa de resistência média à compressão, após 7 dias, em relação à referência. No entanto, o C-CBCA2-CER apresentou uma redução de cerca de 16% em relação ao concreto de referência. É importante ressaltar que, esse aumento na resistência mecânica dos concretos confeccionados com as cinzas CBCA2-600-3h e CBCA2, em relação à referência, foi provavelmente consequência das reações pozolânicas, que são mais pronunciadas para a cinza do bagaço após os 7 dias de cura (CORDEIRO *et al.*, 2009).

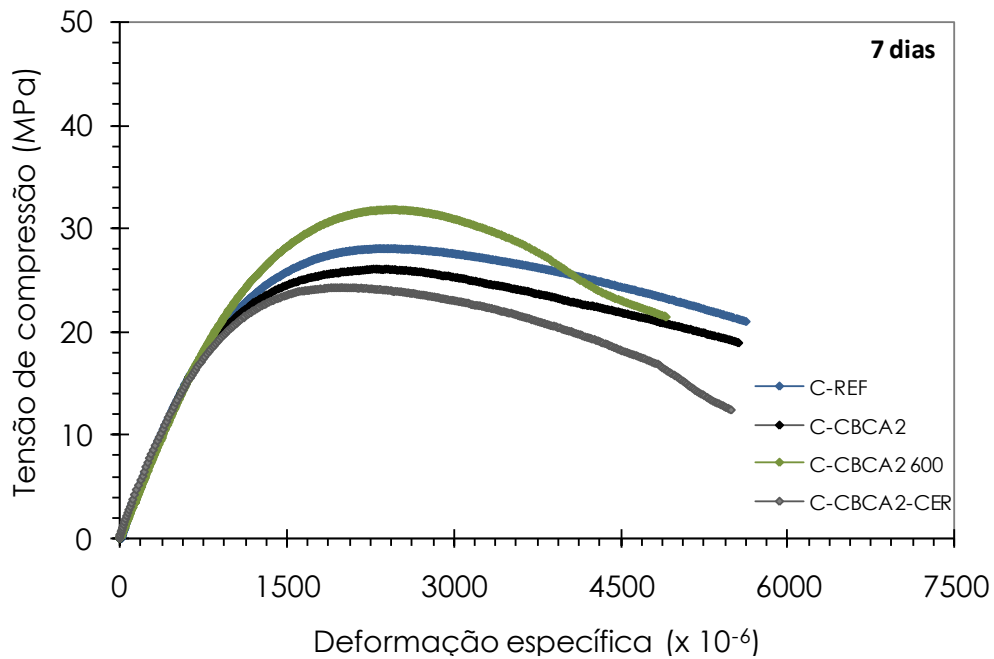


Figura 5.29 - Curvas tensão-deformação dos concretos após 7 dias de cura.

A Tabela 5.5 mostra, além dos resultados de resistência à compressão aos 7 dias, os valores de módulo de elasticidade e de deformação de pico dos concretos. Estatisticamente, pelo teste de Duncan ( $p < 0,05$ ) os valores das deformações de pico e os módulos de elasticidade dos 4 concretos não apresentaram diferenças significativas entre si.

Tabela 5.6 - Valores médios de resistência à compressão, módulo de elasticidade e deformação de pico dos concretos, aos 7 dias, com os respectivos valores de desvio padrão.

Característica	Concretos			
	Referência	CBCA2	CBCA2-600-3h	CBCA2-CER
Resistência à compressão (MPa)	28,5 ( $\pm 2,0$ )	26,9 ( $\pm 1,3$ )	29,9 ( $\pm 1,69$ )	23,9 ( $\pm 0,50$ )
Módulo de elasticidade (GPa)	26,6 ( $\pm 0,2$ )	24,4 ( $\pm 1,5$ )	24,3 ( $\pm 1,11$ )	25,1 ( $\pm 0,84$ )
Deformação de pico ( $\mu\epsilon$ )	2583 ( $\pm 23$ )	2450 ( $\pm 19$ )	2400 ( $\pm 204$ )	2363 ( $\pm 250$ )

As curvas tensão-deformação dos concretos, após 28 dias de cura, estão ilustradas na Figura 5.31 e os valores das resistências à compressão, os módulos de elasticidade e deformações de pico estão na Tabela 5.6. Estatisticamente, os concretos com as cinzas CBCA2-600-3h e CBCA2 não apresentaram diferenças significativas entre si e os resultados mostraram um acréscimo de aproximadamente 10% em relação ao concreto de referência. O mesmo teste de médias de Duncan ( $p < 0,05$ ) mostrou que o concreto com a cinza CBCA2-CER (33,2 MPa) não apresentou diferença significativa em relação à referência (34,6 MPa).

É possível observar que as resistências à compressão dos concretos confeccionados com as cinzas CBCA2-600-3h, CBCA2 e CBCA2-CER, após 28 dias de cura, aumentaram significativamente com relação à tendência de crescimento apresentada aos 7 dias, comparado a referência. Desta forma, os concretos CBCA2-600-3h e C-CBCA2 superaram e o C-CBCA2-CER igualou a resistência à compressão do concreto de referência. Este fato mostra o efeito das reações pozolânicas com o tempo nos concretos, que podem ainda ser altamente ativadas pelas partículas ultrafina das cinzas (CHUSILP *et al.*, 2009). O efeito das reações pozolânicas foi verificado de forma similar por Ganesan *et al.* (2007), onde os concretos com 20% de substituição de cimento por cinza apresentaram aos 28 dias aproximadamente a mesma resistência que o concreto de referência apresentou aos 90 dias. De acordo com o estudo de Cordeiro (2006) o concreto com 20% de substituição de cimento pela cinza do bagaço aos 28 dias apresentou 91% da referência.

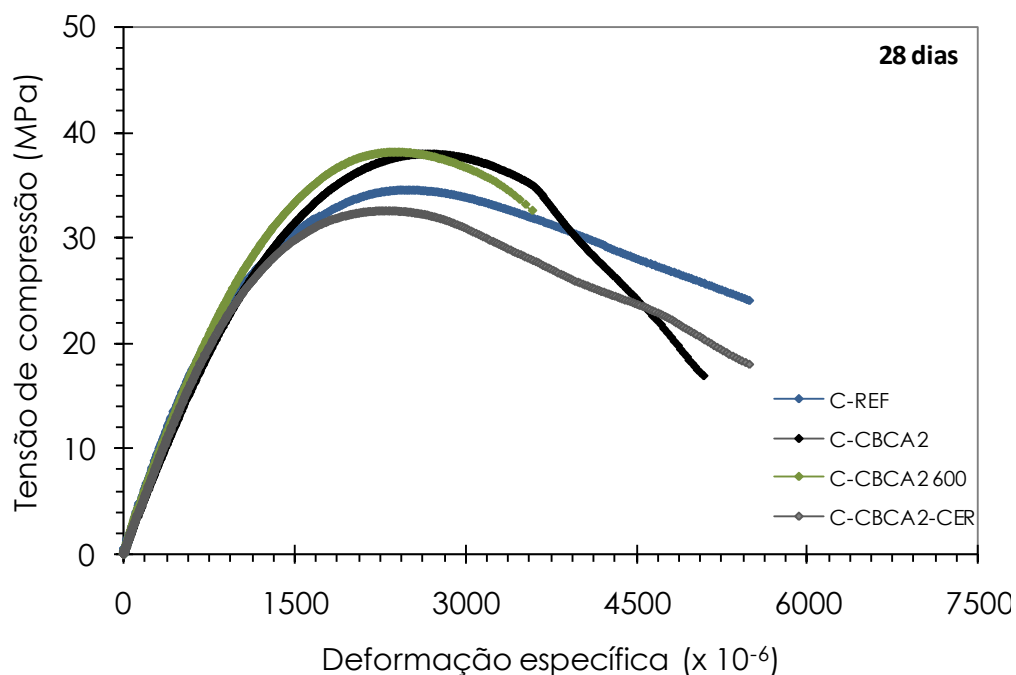


Figura 5.30 - Curvas tensão-deformação dos concretos após 28 dias de cura.

De forma similar as mistura rompidas após 7 dias de cura, os concretos com 28 dias não apresentaram, estatisticamente, diferenças significativas nos valores calculados para os módulos de elasticidade e para as deformações de pico dos concretos.

Tabela 5.7 - Valores médios de resistência à compressão, módulo de elasticidade e deformação de pico dos concretos, aos 28 dias, com os respectivos valores de desvio padrão.

Característica	Concretos			
	Referência	CBCA2	CBCA2-600-3h	CBCA2-CER
Resistência à compressão (MPa)	34,6 ( $\pm 1,2$ )	37,6 ( $\pm 2,4$ )	38,3 ( $\pm 0,38$ )	33,2 ( $\pm 1,98$ )
Módulo de elasticidade (GPa)	28,8 ( $\pm 0,4$ )	27,7 ( $\pm 1,4$ )	28,4 ( $\pm 1,25$ )	29,7 ( $\pm 1,50$ )
Deformação de pico ( $\mu\epsilon$ )	2416 ( $\pm 31$ )	2457 ( $\pm 26$ )	2394 ( $\pm 261$ )	2307 ( $\pm 96$ )

As curvas tensão-deformação e os valores das resistências à compressão, os módulos de elasticidade e das deformações de pico dos concretos após 180 dias de cura estão mostrados na Figura 5.32 e Tabela 5.7, respectivamente. Observa-se a mesma tendência de crescimento de resistência à compressão dos concretos rompidos aos 28 dias, com os valores de C-CBCA2-600-3h e o C-CBCA2 não apresentando diferenças significativas entre si, com acréscimo de cerca de 13% em relação à referência. O concreto de referência alcançou 36,6 MPa de resistência à compressão e 34,6 MPa para o concreto com a cinza CBCA2-CER.

O módulo de elasticidade do concreto de referência alcançou 32,3 GPa. No entanto, estatisticamente, este valor não apresentou diferença significativa em relação aos módulos de elasticidade dos demais concretos, aos 180 dias. De forma similar, pelo teste de médias de Duncan ( $p < 0,05$ ), os resultados das deformações de pico dos 4 concretos também não apresentaram diferenças significativas entre si.

Vale ressaltar, após análise das deformações de pico e dos módulos de elasticidade, para as 4 idades estudadas (3, 7, 28 e 180 dias), que os concretos com as cinzas não apresentaram diferenças significativas, estatisticamente, em relação ao concreto de referência. Isso mostra que a inclusão de aditivo mineral não alterou o módulo de elasticidade do concreto.

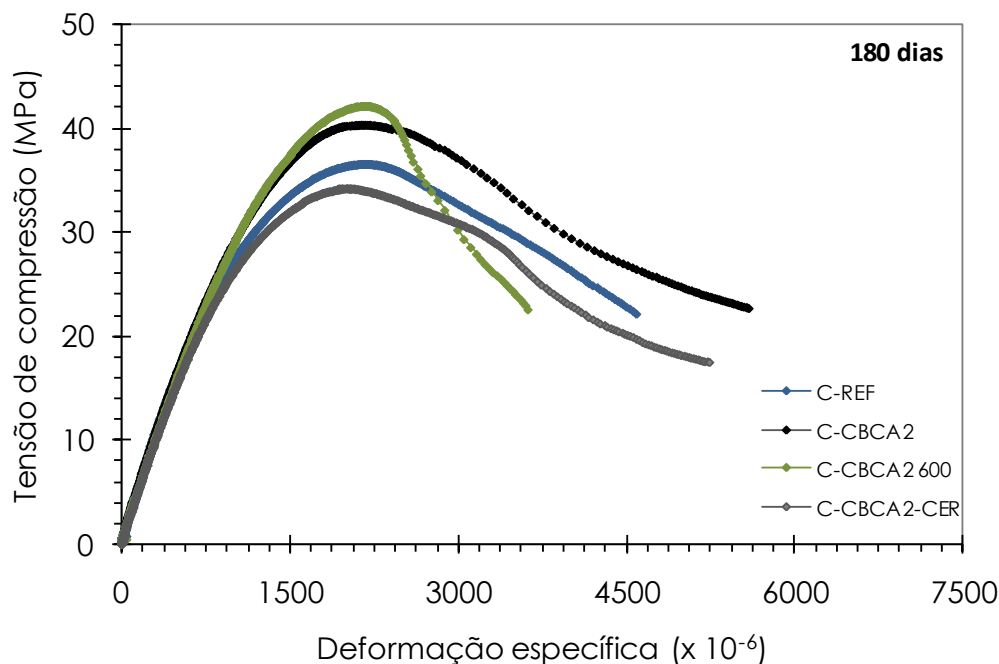


Figura 5.31 - Curvas tensão-deformação dos concretos após 180 dias de cura.

Tabela 5.8 - Valores médios de resistência à compressão, módulo de elasticidade e deformação de pico dos concretos, aos 180 dias, com os respectivos valores de desvio padrão.

Característica	Concretos			
	Referência	CBCA2	CBCA2-600-3h	CBCA2-CER
Resistência à compressão (MPa)	36,6 ( $\pm 0,49$ )	41,1 ( $\pm 1,26$ )	41,9 ( $\pm 1,14$ )	34,6 ( $\pm 0,30$ )
Módulo de elasticidade (GPa)	32,3 ( $\pm 2,56$ )	30,9 ( $\pm 0,26$ )	31,7 ( $\pm 0,67$ )	31,7 ( $\pm 0,72$ )
Deformação de pico ( $\mu\epsilon$ )	2046 ( $\pm 188$ )	2195 ( $\pm 64$ )	2240 ( $\pm 132$ )	2136 ( $\pm 193$ )

Após análise das resistências dos concretos em diferentes idades, é importante ressaltar que o aumento das resistências à compressão, com o tempo, dos concretos com as cinzas se devem a pozolanicidade das cinzas. De acordo com o estudo de atividade pozolânica (item 5.1.4), a CBCA2-600-3h foi, entre as cinzas provenientes da CBCA2, a que apresentou maior atividade pozolânica nos ensaios de índice de atividade



pozolânica e Chapelle modificado. Sendo assim, o ganho de resistência observado nos concretos confeccionados com a cinza confirma a pozolanicidade deste material, consequência do efeito das reações pozolânicas, ocorrendo com o tempo, superando assim, a resistência mecânica do concreto de referência. Isto está de acordo com estudos anteriores de autores como Ganesan *et al.* (2007), Chusilp *et al.* (2009), Cordeiro *et al.* (2009) e Sales *et al.* (2010).

É importante ressaltar que o aumento da resistência mecânica dos concretos com as cinzas do bagaço é efeito da pozolanicidade do material aliado a fatores como alto teor de sílica apresentado pelas cinzas calcinadas (69,6 % e 70,9 % para a CBCA2-600-3h e CBCA2-CER, respectivamente), granulometria ultrafina (cinzas com dimensão média inferior a 10  $\mu\text{m}$ ), e a alta superfície específica apresentada pelas cinzas (principalmente para a CBCA2) (GANESAN *et al.*, 2007; CHUSILP *et al.*, 2009).

## 6. Considerações Finais

### 6.1. Conclusão

A partir dos resultados obtidos no programa experimental, foi possível observar que as cinzas do bagaço da cana-de-açúcar, após passarem por processos controlados de queima e moagem apresentaram resultados satisfatórios à aplicação em argamassas e concretos de resistência convencional.

O processo de moagem das cinzas *in natura* foi efetivo na redução do tamanho das partículas, que resultou em cinzas com granulometrias ultrafinas (3,5  $\mu\text{m}$  para a CBCA1 e 4,7  $\mu\text{m}$  para CBCA2). Após este processo, as cinzas passaram por queimas controladas (em escala laboratorial e semi-industrial) com o objetivo de produzir cinzas com composição química mais adequada ao uso do material como pozolana (teor reduzido de carbono e conseqüentemente, alto percentual de sílica). De acordo com os resultados de composição química das cinzas foi possível observar que as queimas tornaram as cinzas adequadas ao uso como pozolanas, segundo os requisitos químicos indicados na NBR 12653 (1992), com exceção da CBCA1-600-3h. A cinza CBCA2-CER apresentou o maior percentual de sílica (70,9%) e a menor perda ao fogo (0,21%).

A atividade pozolânica, estudada por três métodos distintos mostrou que os ensaios de índice de atividade pozolânica com Cimento Portland e Chappelle modificado apresentaram resultados similares, com classificação de não pozolanicidade apenas para as cinzas CBCA1 e CBCA2 e a mais pozolânica, em ambos os casos, foi a CBCA1-600-6h. Porém, pelo ensaio de condutividade elétrica as cinzas CBCA1 e CBCA2 foram classificadas como altamente pozolânicas, enquanto que as cinzas calcinadas na cerâmica (CBCA1-CER e CBCA2-CER) não apresentaram pozolanicidade.

O estudo de argamassas, feito para diferentes teores de substituição de cimento por cinza do bagaço de 5 a 35% (com variação de 5%), mostrou comportamentos diferenciados para cada uma das cinzas e foi

possível observar que as argamassas confeccionadas com as cinzas calcinadas apresentaram melhores resultados de resistência à compressão. Isso se deve, principalmente, a fatores como composição química, reações pozolânicas, superfície específica e a granulometria ultrafina das cinzas.

As argamassas confeccionadas com a CBCA1 apresentaram uma tendência de queda de resistência associada ao teor crescente de cinza, fato esperado com a não pozolanicidade do material. De acordo com os resultados das argamassas com a CBCA2 foi possível observar que os teores de 20 e 25% não apresentaram diferenças significativas em relação a resistência à compressão da argamassa de referência. Para as cinzas calcinadas CBCA1-600-6h e CBCA1-CER, os resultados mostraram que a variação no teor de cinza teve pouca influência nos valores das resistências à compressão das argamassas. Desta forma, o teor de 35% de substituição de cimento pela cinza CBCA1-600-6h não apresentou diferença significativa em relação à argamassa de referência e o mesmo foi observado para os teores de 5, 10, 15, 20 e 35% de substituição pela CBCA1-CER. Com relação à cinza CBCA2-600-3h, pôde-se observar que a máxima resistência foi alcançada pelos teores de 25 e 30%, que alcançaram 95% a resistência da referência. Enquanto que os teores de 5, 10, 15 e 20% de substituição pela CBCA2-CER apresentou uma redução de apenas 9% em relação à referência.

A escolha das cinzas para a confecção dos concretos foi a partir dos resultados apresentados durante a caracterização das cinzas e do rendimento do material nos fornos. Dessa forma, as cinzas selecionadas para a confecção dos concretos foram: CBCA2, CBCA2-600-3h e CBCA2-CER. O teor de substituição de cimento por cinza (20%) foi selecionado em função do estudo de argamassas.

Nos ensaios de absorção, índice de vazios e massa específica dos 4 concretos pôde-se observar que os resultados desses índices para o C-CBCA2-CER não apresentaram diferenças significativas em relação ao

concreto de referência. O mesmo comportamento foi observado para os concretos confeccionados com as cinzas CBCA2-600-3h e CBCA2.

Em relação as resistências à compressão dos concretos observou-se que após 3 dias de cura o concreto de referência (22,5 MPa) alcançou o máximo valor, seguido pelo C-CBCA2-600-3h (21,3 MPa). Aos 7 dias, os concretos de referência e com a cinza CBCA2-600-3h não apresentaram diferenças significativas entre si, conseqüências do início das reações pozolânicas. Após 28 e 180 dias de cura, os concretos com as cinzas CBCA2-600-3h e CBCA2 não apresentaram diferenças significativas entre si, superando a resistência do concreto de referência. Este aumento na resistência dos concretos com as cinzas são conseqüências de fatores como as reações pozolânicas (ocorrendo com o tempo), granulometria ultrafina das cinzas, superfície específica e composição química.

Os valores dos módulos de elasticidade e das deformações de pico dos concretos mostraram que para cada uma das idades estudadas (3, 7, 28 e 180 dias) os resultados não apresentaram diferenças significativas entre os 4 concretos.

Conclui-se, portanto, que a utilização da cinza do bagaço, além de ocasionado vantagens ao material, contribuiu para diminuição dos problemas ambientais associados à gestão de resíduos e a emissão de CO<sub>2</sub> para a atmosfera. Porém, este material precisou passar por processos controlados (de moagem e queima) a fim de tornar viável a sua aplicação em argamassas e concretos.

## 6.2. Sugestões para trabalhos futuros

A partir dos estudos de caracterização das cinzas (após passarem por processos de moagem e queimas controladas) e da confecção dos concretos com 3 destas cinzas: CBCA2, CBCA2-600-3h e CBCA2-CER, pode-se observar que seria interessante um estudo com concretos confeccionados com as cinzas provenientes da CBCA1: CBCA1-600-6h e

CBCA1-CER, tendo em vista os resultados satisfatórios que estes materiais apresentaram na composição química (alto percentual de sílica e baixa perda ao fogo), no estudo de atividade pozolânica e na confecção de argamassas com diferentes teores de substituição de cimento pelas cinzas.

Tendo em vista a necessidade de atender aos projetos arquitetônicos sob as formas mais arrojadas, as severas condições ambientais e as construções diferenciadas (por exemplo: plataformas marítimas, pontes, usinas nucleares e barragens) é de grande importância a confecção de concretos de alto desempenho com utilização das cinzas do bagaço. Este tipo de concreto, além de elevada resistência à compressão, apresentam uma durabilidade superior ao concreto convencional.

Além disto, seria de suma importância um estudo de reologia nos concretos no estado fresco, que estuda as deformações que o concreto sofre, submetido à influência de uma tensão externa, com o tempo. No estado endurecido, além dos ensaios que já foram realizados (absorção, massa específica, índice de vazios, resistência à compressão e módulo de elasticidade), seria interessante um estudo de fluência na compressão. O ensaio mede o aumento das deformações, ao longo do tempo, provocada por uma tensão constante aplicada ao concreto.

## 7. Referências Bibliográficas:

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, Areia Normal para ensaio de cimento: NBR 7214. Rio de Janeiro, 1982.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, Determinação da absorção e massa específica de agregado graúdo: NBR 9937. Rio de Janeiro, 1987.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. Determinação da composição granulométrica: NBR 7217. Rio de Janeiro, 1987.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, Argamassa e concreto endurecidos – Determinação da absorção de água por imersão – Índice de vazios e massa específica: NBR 9778. Rio de Janeiro, 1987.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. Determinação da massa específica de agregados miúdos por meio do frasco de Chapman: NBR 9776. Rio de Janeiro, 1987.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. Cimento Portland – Determinação da perda ao fogo: NBR 5743. Rio de Janeiro, 1989.

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

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. Materiais pozolânicos – Determinação da atividade pozolânica com cimento Portland – Índice de atividade pozolânica com cimento: NBR 5752. Rio de Janeiro, 1992.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. Cimentos Portland resistentes a sulfatos: NBR 5737. Rio de Janeiro, 1992.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. Cimento Portland destinado à cimentação de poços petrolíferos: NBR 9831. Rio de Janeiro, 1993.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. Concreto – Ensaio de compressão de corpos-de-prova cilíndricos: NBR 5739. Rio de Janeiro, 1994.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. Cimento Portland – Determinação da resistência à compressão – Método de ensaio: NBR 7215. Rio de Janeiro, 1996.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. Concreto – Determinação da consistência pelo abatimento do tronco de cone: NBR NM 67. Rio de Janeiro, 1998.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. Cimento Portland e outros materiais em pó – determinação da massa específica : NBR NM 23. Rio de Janeiro, 2000.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, Concreto – Determinação dos módulos estáticos de elasticidade e de deformação e da curva tensão-deformação: NBR 8522. Rio de Janeiro, 2003.

AKRAM, T., MEMON, S. A., OBAID, H. “Production of low cost self compacting concrete using bagasse ash”, *Construction and Building Materials*, v. 23, pp. 703-712, 2008.

BENEZET, J. C., BENHASSAINE, A. “The influence of particle size on the pozzolanic reactivity of quartz powder. *Powder Technology*”, v. 1, pp. 26-29, 1999.

BLEZARD, R. G., “The history of calcareous cements. In: Hewlett, P. C., *Lea’s Chemistry of Cement and Concrete*”, 4 ed. New York: J. Wiley, pp. 1-19, 1998.

CHUSILP, N., JATURAPITAKKUL, C., KIATTIKOMOL, K. “Utilization of bagasse ash as a pozzolanic material in concrete”, *Construction and Building Materials*, v. 23, pp. 3352-3358, 2009.

COPERSUCAR, Cooperativa Açucareira. On-line. Disponível na Internet via <http://www.copersucar.com.br>. Consultado em agosto de 2011.

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, PEC/COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, Brasil, 2006.

CORDEIRO, G.C., TOLEDO FILHO, R.D., TAVARES, L.M., FAIRBAIRN, E.M.R. “Pozzolanic activity and filler effect of sugar cane bagasse ash in Portland cement and lime mortars”. *Cement and Concrete Composites* v.30, pp.410–418, 2008.

CORDEIRO, G. C., TOLEDO FILHO, R. D., FAIRBAIRN, E. M. R.. Effect of calcinations temperature on the pozzolanic activity of sugar cane bagasse ash. *Construction and Building Materials*, v. 23, pp. 3301-3303, 2009a.

CORDEIRO, G. C., TOLEDO FILHO, R. D., TAVARES, L. M., FAIRBAIRN, E. M. R.. Ultrafine grinding of sugar cane bagasse ash for application as pozzolanic admixture in high-performance concrete. *Cement and Concrete Research*, v. 39, pp. 110-115, 2009b.

CORDEIRO, G. C., TOLEDO FILHO, R. D., FAIRBAIRN, E. M. R.. Use of ultrafine rice husk ash with high-carbon content as pozzolan in high performance concrete. *Materials and Structures*, v. 42, pp. 983-992, 2009c.

CORTEZ, L.; MAGALHÃES, P.; HAPPI, J. Principais subprodutos da agroindústria canvieira e sua valorização. SBPE – Sociedade Brasileira de Planejamento Energético – *Revista Brasileira de Energia*, Vol. 2 - nº 2, 1992.

COSTA, P. L. O. N., *Estatística – 2ª Edição – Editora Edgard Blucher*, 2002.

DANIELS J, ROACH BT. Taxonomy and evolution in sugarcane. In: Heinz DJ, ed. *Sugarcane improvement through breeding*. Amsterdam: Elsevier Press, 7–84, 1987.

DE LARRARD, F., HU, C., SEDRAN, T., SZITKAR, J. C., JOLY, M., CLAUX, F., DERKX, F.. “New rheometer for soft-to-fluid fresh concrete”, *ACI Materials Journal*, v. 94, pp. 234-243, 1997.

DE LARRARD, F., *Concrete mixture proportioning: a scientific approach*, 1 ed. London: E&FN Spon, 421 p., 1999a.

FAIRBAIRN, E. M. R., AMERICANO, B. B., CORDEIRO, G. C., PAULA, T. P., TOLEDO FILHO, R. D., SILVOSO, M. M.. “Cement replacement by sugar cane bagasse ash: CO<sub>2</sub> emissions and potential for carbon credits”. *Journal of Environmental Management*, v. 91, pp. 1864-1871, 2010.

FORMAGINI, S., 2005, “Dosagem científica e caracterização mecânica de concretos de altíssimo desempenho”, Tese de doutorado, PEC/COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, Brasil, 2005.



FREITAS, E. 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, Campos Dos Goytacazes, RJ, 2005.

FUAD, M. Y., ISMAIL, Z., MANSOUR, M. S., ISHAK, Z. A., OMAR, A. K. M.. “Mechanical properties of rice husk ash/polypropylene composites”, *Polymer Journal*, v. 27, n. 10, pp. 1002-1015, 1995.

GANESAN et. at. Evaluation of bagasse ash as supplementary cementitious material. *Cement & Concrete Composites*, pp 515–524, 2007.

HEMERLY, F. X. “Cadeia produtiva da cana-de-açúcar: alternativas para aumento de sua eficiência”. 4ª Reunião Anual de Programação de Pesquisa do CCTA. Campos dos Goytacazes: UENF, 44p, 1999.

HERNÁNDEZ, J. F. M., MIDDENDORF, B., GEHRKE, M., BUDELMANN, H.. “Use of wastes of the sugar industry as pozzolana in lime-pozzolana binders: study of the reaction”. *Cement and Concrete Research*, 28:1525-1536, 1998.

HOPPE, J. F.. “Sistemas Cimento, Cinza Volante e Cal hidratada: mecanismo de hidratação, microestrutura e carbonatação do concreto”. Tese de Doutorado. Universidade de São Paulo, SP, 2008.

IBGE Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. Levantamento sistemático da produção agrícola. On-line. Disponível na Internet via <http://www.ibge.net>. Consultado em 10 de junho de 2011 e 13 de agosto de 2011.

KIELING, A. G. “Influencia da segregação no desempenho de cinzas de casca do arroz como pozolanas e material adsorvente”. Dissertação de Mestrado. Universidade do Vale do Rio dos Sinos, São Leopoldo, Rio Grande do Sul, 2009.

KLEMM, W. A., 1989, “Cementitious materials: historical notes”. *Materials science of concrete I*, Westerville: The American Ceramic Society, pp. 1-26, 1989.

LAWRENCE, P., CYR, M., RINGOT, E., 2003, “Mineral admixtures in mortars – Effect of inert materials on short-term hydration”, *Cement and Concrete Research*, v. 33, n. 12, pp. 1939-1947, 2003.

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

MALHOTRA, V. M., MEHTA, P. K.. *Pozzolanic and cementitious materials*, 1 ed. Amsterdam: Gordon and Breach Publishers, 191 p, 1996.

MANSANEIRA, E. C.. "Verificação da potencialidade do uso da cinza do bagaço da cana-de-açúcar em cimento Portland". *Disertação de Mestrado*. Universidade Estadual de Londrina, Paraná, 2010.

MASSAZZA, F.. "Pozzolana and pozzolanic cements". *Chemistry of cement and concrete*, 4 ed. New York: J. Wiley, pp. 471-631, 1998.

MEHTA, P. K., MONTEIRO, P.J.M.. "Concreto: Estrutura, Propriedades e Materiais", 1ª Edição, Editora PINI, 1994.

MORALES, E. V., VILLAR-COCIÑA, E., FRÍAS, M., SANTOS, S. F., SAVASTANO JR., H.. "Effects of calcining conditions on the microstructure of sugar cane waste ashes (SCWA): Influence in the pozzolanic activation". *Cement & Concrete Composites*, v. 31, pp. 22-28, 2009.

MOREIRA, J. R., GOLDEMBERG, J., "The alcohol program", *Energy Policy*, v. 27, n. 4, pp. 229-245, 1999.

MOTA, M. B., BRAICK, P. R.. "História: Das Cavernas ao Terceiro Milênio". 2ª Edição, Editora Moderna, 1999.

PADUA, P. G. L., SOUZA, C. A., AGUIAR, M. T. P., "Physical-Chemical Characteristics of Cane Bagasse Ashes used in the manufacturing of concretes", *Congrés International de la Chimie des Ciments*, 2011.

PAYÁ, J., MONZÓ, J., BORRACHERO, M. V., DÍAZ-PINZÓN, L., ORDÓÑEZ, L. M., 2002, "Sugar-cane bagasse ash (SCBA): studies on its properties for reusing in concrete production", *Journal of Chemical Technology and Biotechnology*, v. 77, n. 1, pp. 321-325, 2002.

RAVERDY, M., BRIVOT, F., PAILLÈRE, A. M., BRON, R.. "Appréciation de l'activité pouzzolanique de constituents secondaires". *Congrés International de la Chimie des Ciments*, Paris, France, v. 3, pp. 36-41, 1980.

RODRIGUES, M. S.. "CARACTERIZAÇÃO DE CINZA RESIDUAL DA QUEIMA DE CASCA DE ARROZ PARA A PRODUÇÃO DE

ARGAMASSA”. Dissertação de Mestrado. Universidade de Campinas , SP, 2008.

SALES, A., LIMA, S.A.. “Use of Brazilian sugarcane bagasse ash in concrete as sand replancement”, Waste Management, in press. 2010.

SEDRAN, T.. “Rheologie et rheometrie des betons. Application aux betons Autonivelants”. These de Doctorat, École Nationale des Ponts et Chaussées, Paris, France, 220 p., 1999.

SILVA, A. S. M.. “Dosagem de concreto pelos métodos de empacotamento compressível e Aitcin-Faury modificado”. Dissertação de Mestrado, PEC-COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, Brasil, 2004.

SINGH, N. B., SINGH, V. D., RAI, S..”Hydration of bagasse ash-blended Portland cement”. Cement and Concrete Research, 30:1485-1488, 2000.

ÚNICA, União da Indústria da Cana-de-Açúcar. On-line. Disponível na Internet via <http://www.unica.com.br>. Consultado em 18 de julho de 2011.

VILLAR-COCIÑA, E.; VALENCIA-MORALES, E. GONZÁLES-RODRIGUES, 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, p. 517-524, 2003.

WAACK, R. S., NEVES, M. F.. “Competitividade do sistema agro-industrial da cana-de-açúcar”. In: Farina, E. M. M. Q., Zylbersztajn, D. (org), Competitividade no agrobusiness brasileiro, São Paulo: PENSA/FEA/USP, 197 p., 1998.

Wikipedia, Enciclopédia. Disponível na Internet via <http://www.wikipedia.org.br>, Consultado em julho de 2011.

## **ANEXO A: MODELO DE EMPACOTAMENTO COMPRESSÍVEL (MEC)**

De Larrard (1999) com base em mais de uma década de estudo desenvolveu, no Laboratoire Central des Ponts et Chaussées (LCPC, Paris), uma teoria que soluciona a questão do empacotamento de misturas secas para os componentes utilizados na dosagem dos concretos, denominado Modelo de Empacotamento Compressível (MEC).

O método de De Larrard (1999) é baseado num modelo de empacotamento de partículas para a otimização de misturas granulares objetivando a máxima compacidade possível. Em seguida, a dosagem é feita a partir da fração de volume otimizado dos materiais adequando às propriedades nos estados fresco e endurecido. O objetivo desta ferramenta de dosagem é proporcionar um produto final com o mais alto desempenho, diminuindo o risco de segregação (FORMAGINI, 2005). Sua formulação permite dosar concretos com resistência normal, alto desempenho, auto-adensáveis, compactados a rolo, de diferentes densidades, entre outros.

O MEC é dividido, segundo De Larrard (1999), em dois módulos distintos: empacotamento virtual e empacotamento real. O primeiro módulo corresponde a um modelo matemático que possibilita a obtenção da máxima compacidade possível de uma mistura granular, que seria obtida empilhando todos os seus grãos um a um. Já o empacotamento real é obtido por um procedimento físico de compactação dos grãos (vibração, apilonamento, molhagem, etc.). Os dois métodos se correlacionam através de um índice de compactação, permitindo assim, o cálculo da compacidade real de uma mistura granular. Este cálculo ainda pode ser otimizado, para então o MEC correlacionar as propriedades do concreto nos estados fresco e endurecido através de fórmulas matemáticas que são validadas experimentalmente.

A compacidade virtual de empacotamento ( $\beta$ ) é a máxima compacidade de uma mistura, quando se arranjam as partículas uma a

uma em um volume infinito, correspondendo a um arranjo geométrico ideal. Por exemplo, para o caso de partículas cúbicas idênticas se consegue a compactação máxima ( $\beta = 1$ ) arranjando os cubos de um a um, face a face (Figura A.1). Outro exemplo é o caso do empacotamento de esferas de tamanhos iguais, em que a compactidade virtual é  $\beta = 0,74$ , correspondente ao arranjo cúbico de face centrada, CFC (FORMAGINI, 2005).

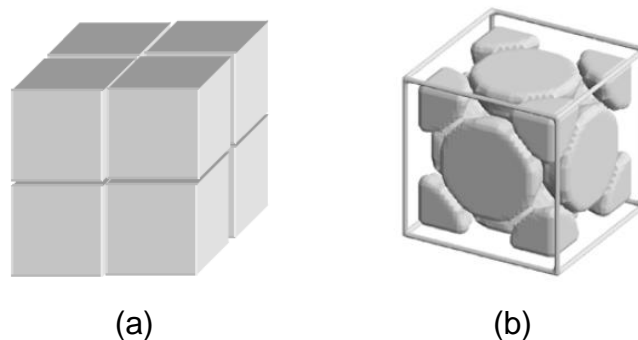


Figura A.1 - Fator de empacotamento (a) cubos ( $\beta = 1$ ), (b) esfera CFC ( $\beta = 0,74$ ) (FORMAGINI, 2005).

Outro conceito que deve ser levado em consideração é a classe de grãos dominante. Se a ordenação dos diâmetros das classes granulares forem pré-estabelecido na seqüência  $d_1 > \dots > d_i > \dots > d_n$  (sem segregação), a classe granular  $i$  fica sendo dominante se garantir a continuidade sólida do corpo granular, de acordo com a Figura A.2. Nesta exemplificação, a continuidade sólida é dada pelos grãos com maior diâmetro e os grãos de menores dimensões apenas ocupam os vazios (FORMAGINI, 2005). O empacotamento máximo de uma mistura constituída de grãos com variados tamanhos é obtido quando os grãos de diâmetros menores preenchem por completo os vazios entre os grãos maiores.

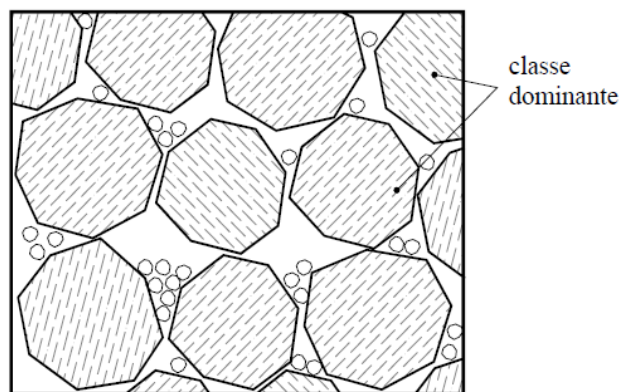


Figura A.2 - Continuidade sólida granular (FORMAGINI, 2005).

No segundo módulo do MEC, são estabelecidas as relações que ligam as propriedades virtuais (geométricas) às reais da mistura granular. Por exemplo, pegando um recipiente com um grande número de partículas cúbicas, é impossível se conseguir, através de um processo real obter a compactação máxima (100%) como indica o arranjo virtual (SILVA, 2004). Sendo assim, o MEC relaciona os dois módulos.

A compactação real de uma mistura ( $\phi$ ) é definida como o volume de sólidos que ela ocupa em um volume unitário. O empacotamento virtual ( $\gamma$ ) e o empacotamento real ( $\phi$ ) são relacionados através de um índice  $K$  que caracteriza o procedimento experimental de compactação utilizado, que expressa em que extensão o empacotamento real se aproxima do virtual (DE LARRARD, 1999). O índice  $K$  (Equação 4) depende apenas do protocolo experimental de empacotamento e pode ser dada pela expressão a seguir:

$$K = \sum_{i=1}^n \frac{y_i/\beta_i}{\frac{1}{\phi} - \frac{1}{\gamma^{(i)}}} \quad \text{Equação A.1}$$

Sendo,

$n$  - número de classes de grãos;

$i$  - classe de grãos;

$\beta_i$  - compacidade virtual da classe de grãos;  
 $\gamma_i$  - fração volumétrica.

Formagini (2005) dosou concretos fibrosos auto-adensáveis de altíssimo desempenho tendo como base a formulação do MEC e a caracterização físico-química dos concretos. O autor elaborou, através do MEC, um software (MECFOR) em código FORTRAN, visando à otimização de misturas granulares secas e dosou os concretos com objetivo de atingir 160 MPa de resistência a compressão em 28 dias de cura. Entre os resultados, destaca-se que o autor obteve uma correlação de 0,943 para a resistência a compressão entre a simulação computacional e os resultados experimentais dos traços realizados em laboratório.

Silva (2007) desenvolveu um estudo experimental do efeito do aditivo redutor de retração (RAA) na retração autógena livre de concretos de alto desempenho (CAD). O programa computacional Betonlab Pro2®, desenvolvido por De Larrard (1999) e colaboradores, a partir do MEC, foi utilizado para a dosagem dos concretos de referência, apesar do programa não abordar o uso de aditivo redutor de retração. Foram dosados dois concretos:  $f_{ck}=80$  MPa e  $f_{ck}=60$  MPa. As propriedades comparadas foram: abatimento, teor de ar, resistência à compressão (aos 7 e 28 dias), módulo de elasticidade, tensão de escoamento e viscosidade plástica. A Tabela 2.3 apresenta uma comparação entre os resultados obtidos na dosagem computacional e experimental.

Tabela A.1 - Resultados experimentais médios e teóricos, calculados pelo programa computacional Betonlab Pro2® a partir do Modelo de Empacotamento compressível de De LARRARD (1999), para o concreto de referência C80 (SILVA, 2007).

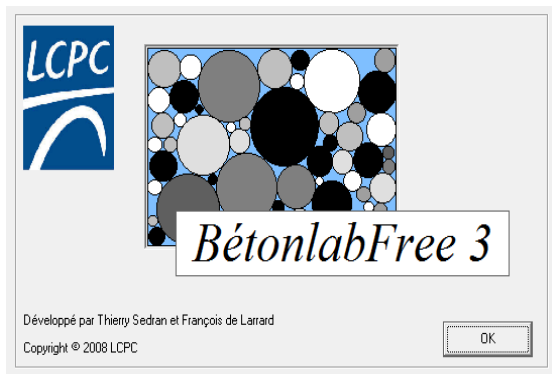
Método	Abatimento (cm)	Teor de ar (%)	fc,7 (MPa)	fc,28 (MPa)	E (GPa)	$\tau_0$ (Pa)	$\mu$ (Pa.s)
Experimental	21,0	1,5	74,6	89,3	35,9	400	269
<i>Betonlab Pro2®</i>	23,1	1,1	76,3	86,8	45,8	698	412

Segundo a autora, os resultados teóricos apresentam uma correlação muito boa com os experimentais, para o abatimento e resistência à compressão. Porém, superestima os resultados de módulo de elasticidade, tensão de escoamento e viscosidade plástica.

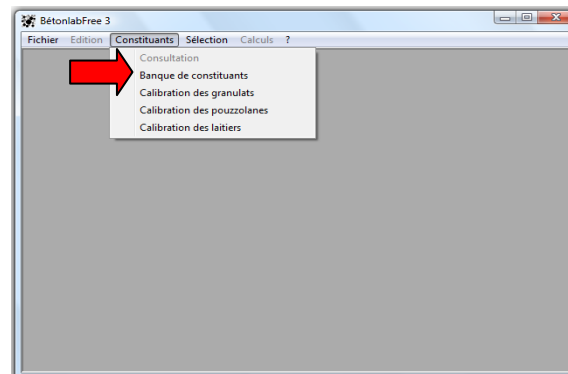


## **ANEXO B: DOSAGEM DO CONCRETO NO PROGRAMA BETÓN LAB**

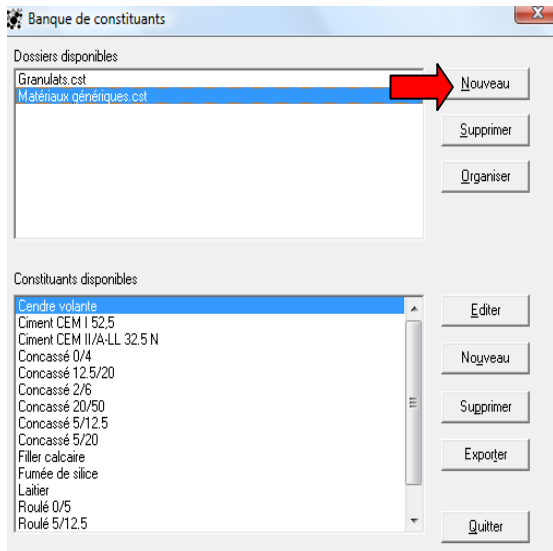
A dosagem dos concretos fo feita no programa Betonlab Pro2<sup>®</sup> desenvolvido no LCPC, a partir do Modelo de Empacotamento Compressível, proposto por DE LARRARD e colaboradores. O modelo está descrito em detalhes em DE LARRARD (1999). O programa realiza a dosagem em três etapas. A primeira etapa é caracterizada pela criação de um banco de dados com as propriedades dos materiais constituintes do concreto. A Figura B.1 ilustra a tela de apresentação do programa (Figura B.1-a), a ferramenta de entrada no banco de dados (Figura B.1-b), o acesso aos bancos de dados já existentes (Figura B.1-c) e a criação de um novo (Figura B.1-d).



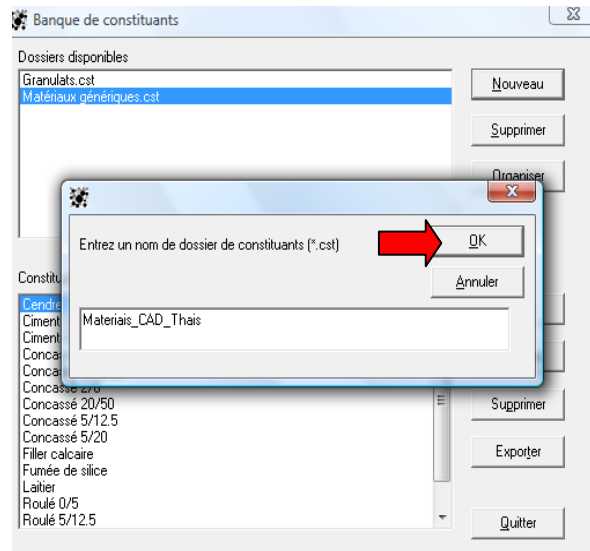
(a)



(b)



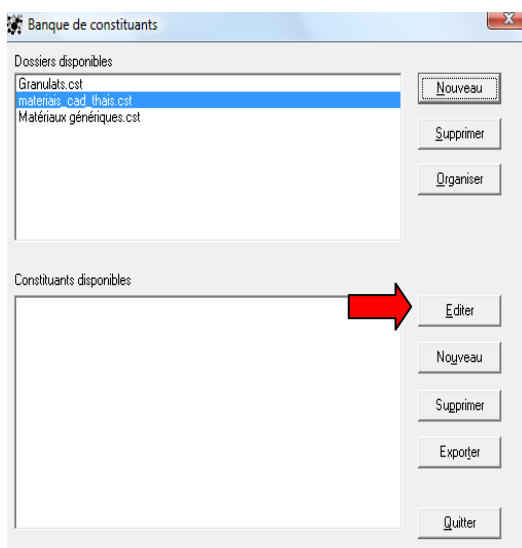
(c)



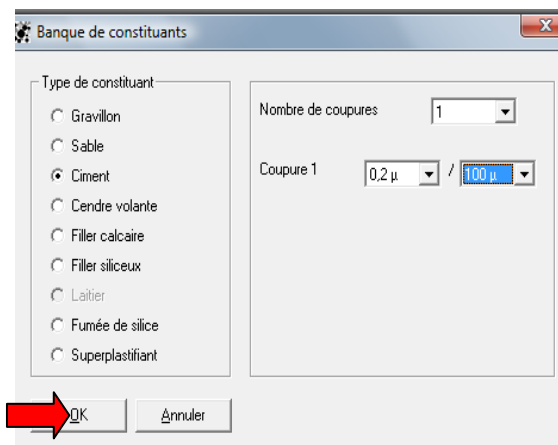
(d)

Figura B.1 - Tela inicial do programa (a), abertura do banco de dados (b), criação de um novo (c), identificação do novo banco de dados (d).

Após a criação de um novo banco de dados, foram definidas as propriedades dos materiais constituintes do concreto. Na Figura B.2 encontra-se a seqüência de preenchimento dos dados do cimento: definição do número de classes, resistência em diferentes idades, granulometria e compacidade.



(a)



(b)

Propriétés du ciment

Général | Composition | Propriétés | Squelette | Coupure 1

Nom: Cimento CP V ARI LAFARGE

Date: 15/11/2010 14:57:15

Commentaires: Superplastifiant utilisé: Glenium 51

Coût (Euro/t):

Buttons: Enregistrer, Annuler, Outils

(c)

Propriétés du ciment

Général | Composition | Propriétés | Squelette | Coupure 1

Classe vraie à 1 jour: 20,4

Classe vraie à 2 jours:

Classe vraie à 3 jours: 31,5

Classe vraie à 7 jours: 38,6

Classe vraie à 28 jours: 47,9

Classe vraie à 90 jours:

Classe vraie à 360 jours:

Masse volumique (kg/m3): 2960

Capacité thermique (kJ/K.Kg): 0,76

Dosage de saturation (%): 0,35

Retrait endogène:

Kc (MPa):

Buttons: Enregistrer, Annuler, Outils

(d)

Propriétés du ciment

Général | Composition | Propriétés | Squelette | Coupure 1

Diamètre	Passant %	$\beta$	$\beta^*$
0,2 $\mu$	0		
0,25 $\mu$	0,24		
0,315 $\mu$	0,6		
0,4 $\mu$	1,11		
0,5 $\mu$	1,75		
0,63 $\mu$	2,5		
0,8 $\mu$	3,31		
1 $\mu$	4,16		
1,25 $\mu$	5,1		
1,6 $\mu$	6,01		
2 $\mu$	7,09		
2,5 $\mu$	8,45		
3,15 $\mu$	10,46		
4 $\mu$	13,5		

Compacités propres virtuelles constantes par coupure

Buttons: Enregistrer, Annuler, Outils, Graphe

(e)

Propriétés du ciment

Général | Composition | Propriétés | Squelette | Coupure 1

Coupure: 0,2  $\mu$  / 100  $\mu$

Sans adjuvant

Compacité expérimentale: 0,52

Indice de serrage: 6,7

Confinement: Aucun

À saturation

Compacité expérimentale: 0,52

Indice de serrage: 6,7

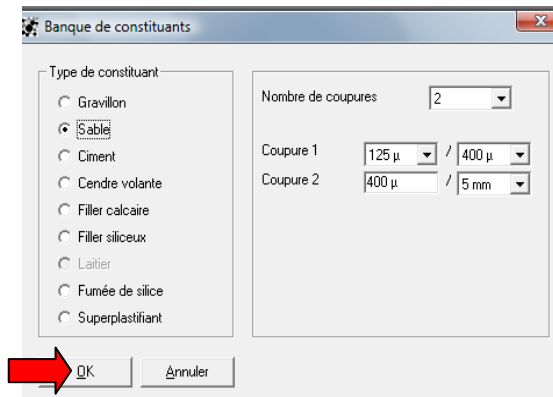
Confinement: Aucun

Buttons: Enregistrer, Annuler, Outils

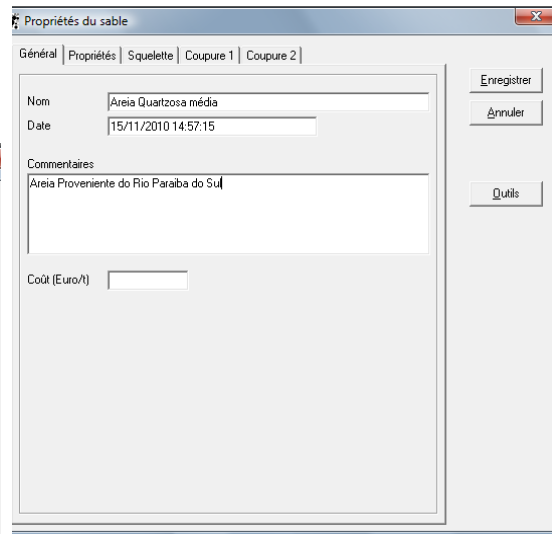
(f)

Figura B.2 – Adição de um novo constituinte ao banco de dados (a), escolha do material: cimento (b), definindo as características do material (c), resistência à compressão em diferentes idades (d), granulometria (e) e compacidade (f).

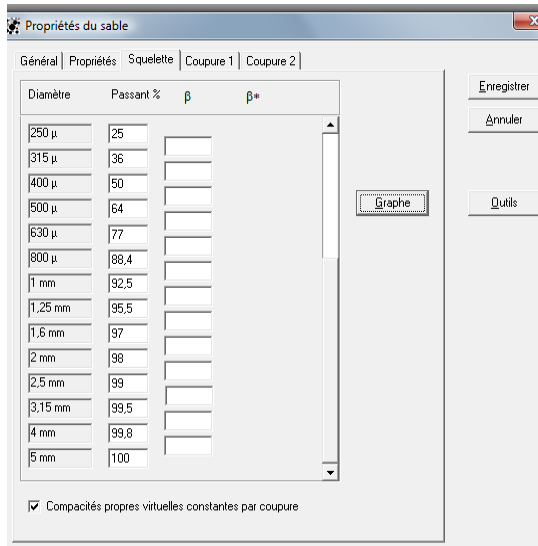
A Figura B.3 ilustra as definições de um novo constituinte: agregado miúdo (areia). Este material foi dividido em 2 classes e suas características foram apresentadas juntamente com a granulometria e a compacidade experimental das duas classes distintas.



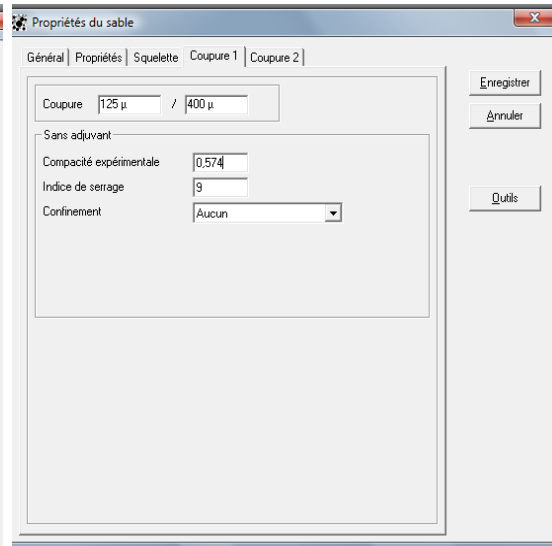
(a)



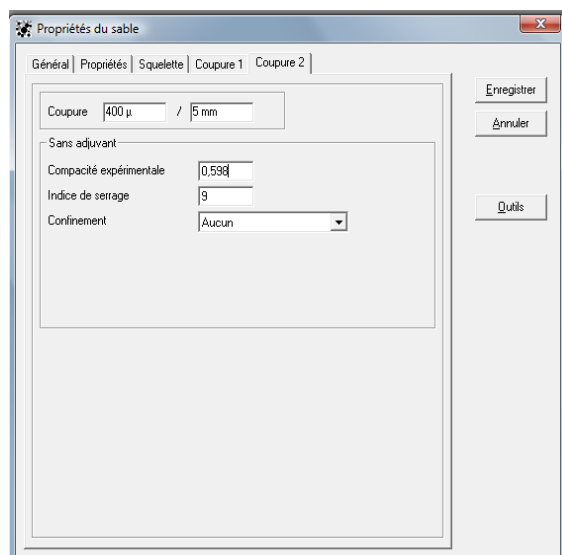
(b)



(c)



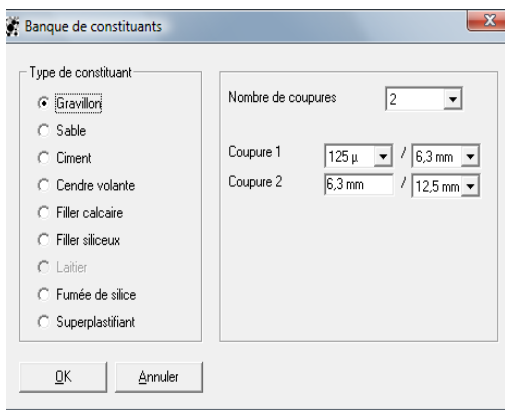
(d)



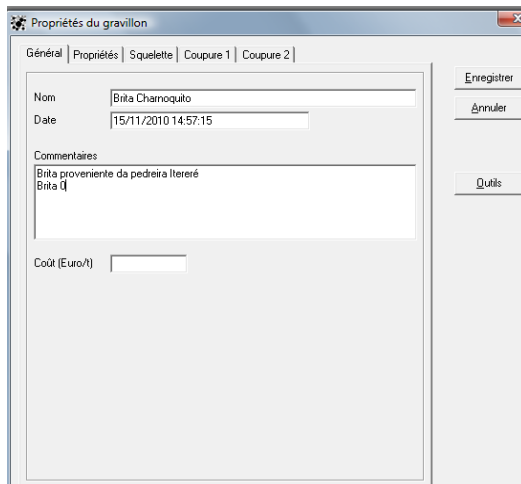
(e)

Figura B.3 – Adição da areia ao banco de dados (a), identificação do material (b), granulometria (c) e propriedades da classe 1 (d) e da classe 2 (e).

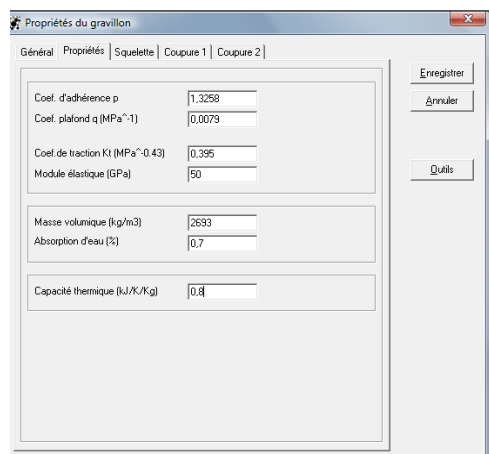
A inclusão do agregado graúdo ao banco de dados é mostrada na Figura B.4, onde as características do material (que foi dividido em 2 classes) foram apresentadas no programa: parâmetros “p” e “q”, granulometria e compacidade.



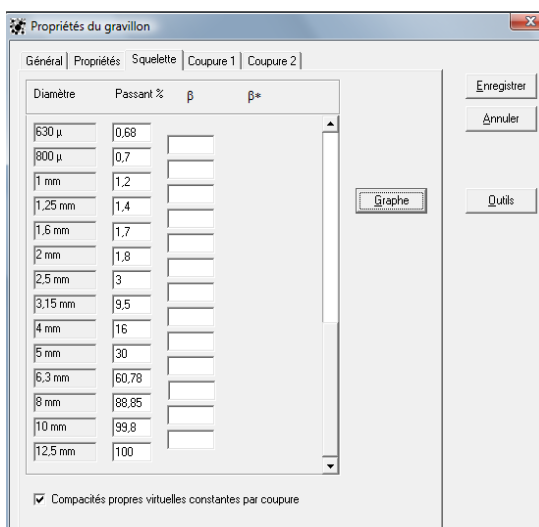
(a)



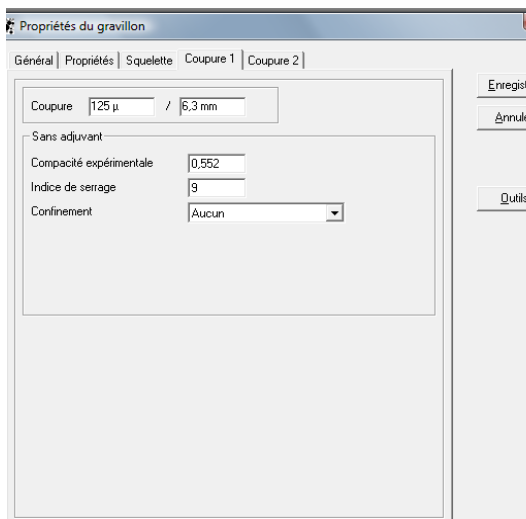
(b)



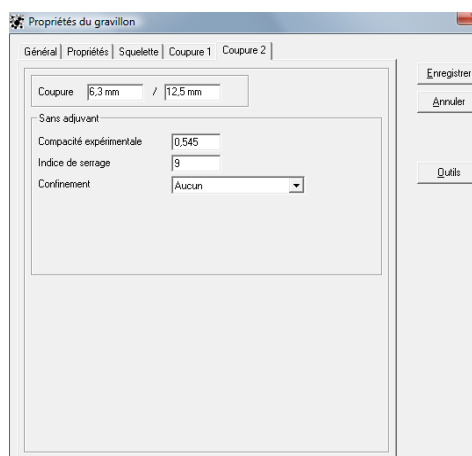
(c)



(d)



(e)



(f)

Figura B.4 – Adição do agregado graúdo ao banco de dados (a), denominação (b), definição dos parâmetros “p” e “q” (c), granulometria (d), compacidade da classe 1 (e) e da classe 2 (f).

O último constituinte a ser acrescentado ao banco de dados foi a aditivo superplastificante (Figura B.5), onde foram definidas a concentração de sólidos e a massa específica do material.

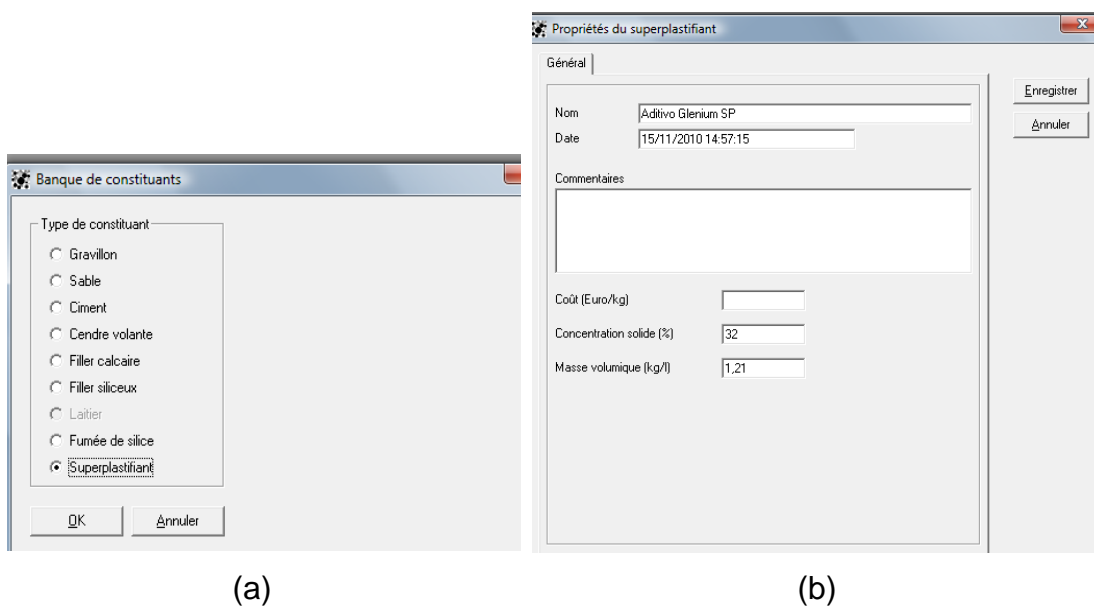
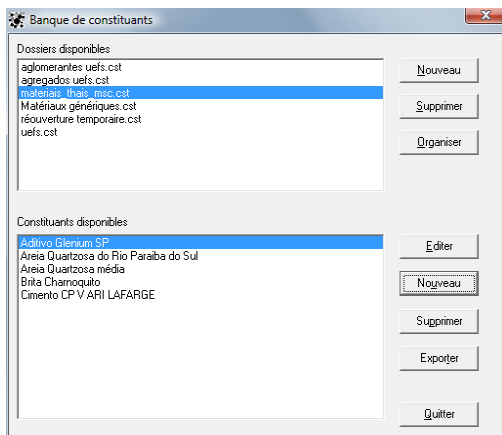
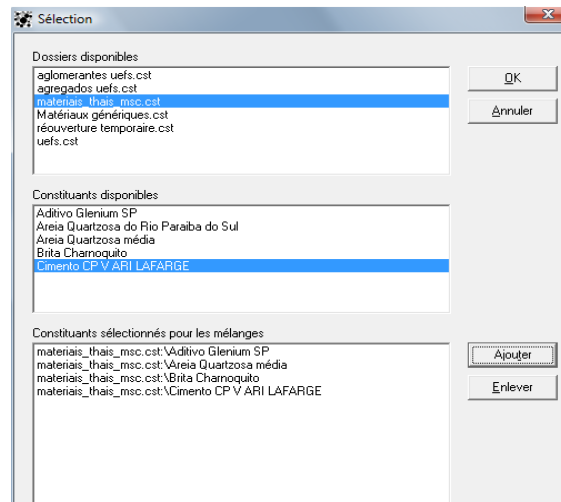


Figura B.5 – Adição do aditivo superplastificante (a) e definição das características do material (b).

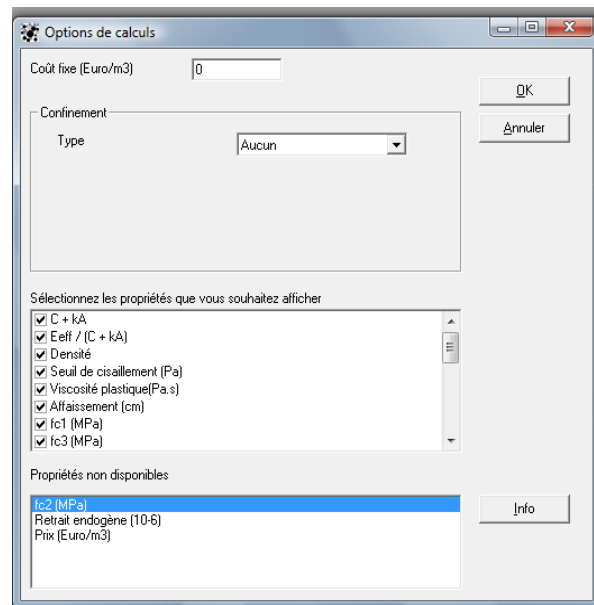
Com o banco de dados já definido, iniciou-se a segunda etapa do programa: o traço de partida para a dosagem. A Figura B.6 ilustra a escolha do banco de dados (Figura B.6-a), a seleção dos materiais que farão parte do concreto (Figura B.6-b), a escolha dos itens que o programa deve dosar (Figura B.6-c): fator água-cimento, resistência á compressão após 1, 3, 7 e 28 dias de cura, abatimento, entre outros. Então, o usuário estabelece as proporções dos constituintes para a dosagem de partida do concreto (Figura B.6-d).



(a)

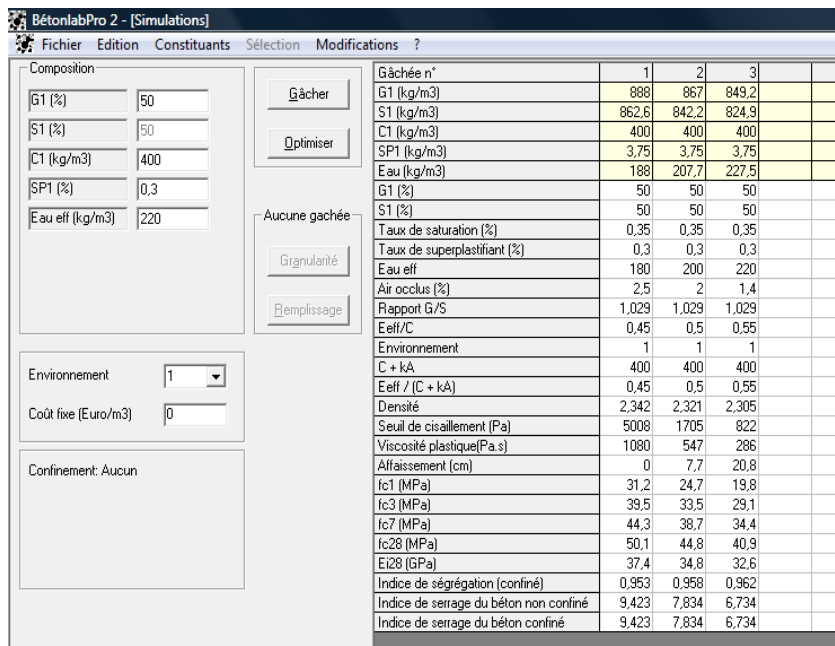


(b)



(c)

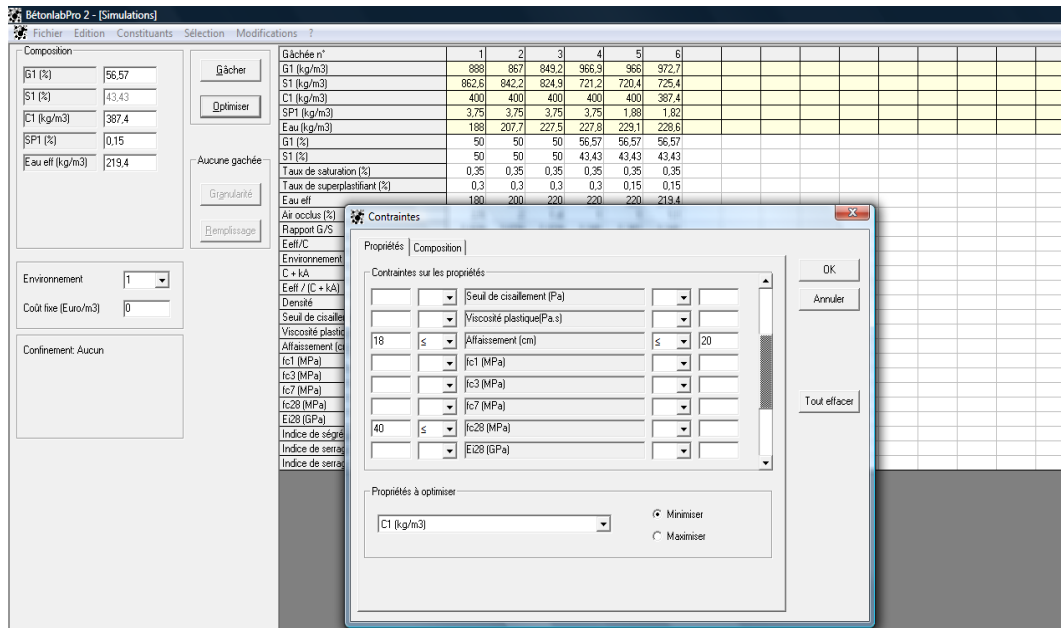




(d)

Figura B.6 - Escolha do banco de dados (a), seleção dos constituintes dentro do banco de dados (b), seleção dos itens à calcular (c), dosagens de partida, definidas pelo usuário (d).

A última etapa da dosagem é constituída pela otimização da mistura, onde se definiram os parâmetros a serem otimizados, os graus de liberdade e as condições de contorno. A Figura B.7-a mostra o parâmetro que foi otimizado (quantidade de cimento) e as condições de contorno: abatimento variando entre 180 e 200 mm e resistência à compressão aos 28 dias igual a 40 MPa. Na Figura B.7-b está ilustrado a dosagem final do concreto.



(a)

Gâchée n°	1	2	3	17	23	24	25	26
G1 (kg/m3)	888	867	849,2	964	893,4	893,7	893,9	893,8
S1 (kg/m3)	862,6	842,2	824,9	718,9	779	779,2	779,4	779,3
C1 (kg/m3)	400	400	400	387,4	387,4	387,4	387,4	387,4
SP1 (kg/m3)	3,75	3,75	3,75	0	0,61	0,3	0	0,18
Eau (kg/m3)	188	207,7	227,5	229,7	229,1	229,3	229,6	229,4
G1 (%)	50	50	50	56,57	52,7	52,7	52,7	52,7
S1 (%)	50	50	50	43,43	47,3	47,3	47,3	47,3
Taux de saturation (%)	0,35	0,35	0,35	0,35	0,35	0,35	0,35	0,35
Taux de superplastifiant (%)	0,3	0,3	0,3	0	0,05	0,03	0	0,01
Eau eff	180	200	220	219,4	219,4	219,4	219,4	219,4
Air occlus (%)	2,5	2	1,4	1,7	2	2	2	2
Rapport G/S	1,029	1,029	1,029	1,341	1,147	1,147	1,147	1,147
Eff/C	0,45	0,5	0,55	0,566	0,566	0,566	0,566	0,566
Environnement	1	1	1	1	1	1	1	1
C + kA	400	400	400	387	387	387	387	387
Eff / (C + kA)	0,45	0,5	0,55	0,566	0,566	0,566	0,566	0,566
Densité	2,342	2,321	2,305	2,3	2,29	2,29	2,29	2,29
Seuil de cisaillement (Pa)	5008	1705	822	5972	2752	4141	6909	5013
Viscosité plastique (Pa.s)	1080	547	286	396	362	388	420	400
Affaissement (cm)	0	7,7	20,8	0	0	0	0	0
fc1 (MPa)	31,2	24,7	19,8	16,4	15,4	15,5	15,5	15,5
fc3 (MPa)	39,5	33,5	29,1	26,1	25,2	25,3	25,3	25,3
fc7 (MPa)	44,3	38,7	34,4	31,7	30,9	30,9	30,9	30,9
fc28 (MPa)	50,1	44,8	40,9	38,3	37,6	37,6	37,7	37,6
Ei28 (GPa)	37,4	34,8	32,6	31,2	31,2	31,2	31,2	31,2
Indice de ségrégation (confiné)	0,953	0,958	0,962	0,957	0,959	0,958	0,957	0,958
Indice de serrage du béton non confiné	9,423	7,834	6,734	7,312	7,131	7,244	7,376	7,294
Indice de serrage du béton confiné	9,423	7,834	6,734	7,312	7,131	7,244	7,376	7,294

(b)

Figura B.7 – Condições de contorno e otimização (a) e dosagem final do concreto (b).