

CARACTERIZAÇÃO DA CINZA DO BAGAÇO DA CANA-DE-AÇÚCAR
DO MUNICÍPIO DE CAMPOS DOS GOYTACAZES PARA USO NA
CONSTRUÇÃO CIVIL

ELAINE DE SOUZA FREITAS

UNIVERSIDADE ESTADUAL DO NORTE FLUMINENSE DARCY RIBEIRO
– UENF –

CAMPOS DOS GOYTACAZES – RJ
ABRIL – 2005

CARACTERIZAÇÃO DA CINZA DO BAGAÇO DA CANA-DE-AÇÚCAR
DO MUNICÍPIO DE CAMPOS DOS GOYTACAZES PARA USO NA
CONSTRUÇÃO CIVIL

ELAINE DE SOUZA FREITAS

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

Orientador: Prof. Jean Marie Désir

Co-orientador: Prof. Dylmar Penteado Dias

CAMPOS DOS GOYTACAZES – RJ

ABRIL - 2005

CARACTERIZAÇÃO DA CINZA DO BAGAÇO DA CANA-DE-AÇÚCAR
DO MUNICÍPIO DE CAMPOS DOS GOYTACAZES PARA USO NA
CONSTRUÇÃO CIVIL

ELAINE DE SOUZA FREITAS

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

Aprovada em 29 de abril de 2005.

Comissão Examinadora:

Prof. Felipe José da Silva (D. Sc.) - IME

Prof. Jonas Alexandre (D. Sc.) – UENF

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

Prof. Jean Marie Désir (D. Sc.) – UENF

“O amor é a maior alegria, no entanto,
é também a semente que faz germinar
a árvore da saudade.”

Ao meu pai, Orlando Freitas (*In memoriam*)

AGRADECIMENTOS

As nossas principais conquistas não são frutos de um trabalho isolado, tão pouco individual, por isto agradeço, primeiramente, a Deus por mais esta oportunidade de crescimento.

À minha família, em especial minha mãe, pelo incentivo e apoio não só durante este período, mas em toda minha vida.

Aos meus orientadores, Jean e Dylmar, pela constante disposição em ajudar, e por proporcionarem o avanço deste trabalho, compartilhando as dificuldades de execução e os êxitos obtidos.

Aos demais professores do LECIV, em especial ao Jonas pelo incentivo e colaboração e ao Tibana pelo carinho e amizade.

Ao Ricardo Schwan pelo carinho, pela presença constante, às vezes mesmo à distância, nos principais momentos da minha vida.

À Érica, minha “irmã”, pela amizade, carinho e, sobretudo, pelo apoio e encorajamento para superar as dificuldades vividas.

Ao Anderson, meu braço direito, pela ajuda indispensável durante a execução deste trabalho, e, é claro, pelo bom humor que tornava o trabalho mais agradável.

Aos amigos Willisses, Bruno e Gustavo, meus companheiros de jornada, pela amizade, apoio, convivência, crescimento. À Giselle, Luciana e Fernanda pela companhia, amizade e alegrias compartilhadas. Aos demais colegas da turma de 1999, por tudo que dividimos nestes anos.

Aos amigos Vítor, Leo, Marcos, Adriano, Gabriel, Thiago, Carol, Frederico, Paula, pela boa convivência e troca de experiências.

Aos funcionários do LECIV, André, Milton, Vanuza, Antônio, Alexandre (*In memorian*), pela ajuda no desenvolvimento da pesquisa.

À Rosane (LCFIS), Christina, Maristela e Thiago (LCQUI), Ângelus, Bruno e Thereza (LAMAV), Guilherme (COPPE - UFRJ) e ao prof. Felipe (IME) pela boa vontade e auxílio nos ensaios desenvolvidos nesta dissertação.

A todos os amigos que torceram pela conclusão deste trabalho.

SUMÁRIO

| | |
|---|-----|
| LISTA DE FIGURAS..... | iv |
| LISTA DE TABELAS..... | vii |
| RESUMO..... | ix |
| ABSTRACT..... | x |
| | |
| 1 – INTRODUÇÃO..... | 01 |
| 1.1 – Justificativa do Trabalho..... | 03 |
| 1.2 – Objetivos..... | 04 |
| 1.3 – Estrutura da Dissertação..... | 05 |
| | |
| 2 – MATERIAIS POZOLÂNICOS..... | 06 |
| 2.1 – Definição..... | 07 |
| 2.2 – Classificação..... | 07 |
| 2.3 – Reação Pozolânica..... | 08 |
| 2.4 – O Papel das Pozolanas na Construção Civil..... | 10 |
| | |
| 3 – CANA-DE-AÇÚCAR E SEUS PRINCIPAIS PRODUTOS E RESÍDUOS..... | 15 |
| 3.1 – O Histórico da Cana-de-Açúcar..... | 15 |
| 3.1.1 – Origem..... | 15 |
| 3.1.2 – A Evolução da Cana-de-Açúcar no Brasil..... | 16 |
| 3.1.3 – A Cana-de-Açúcar nos Dias Atuais..... | 18 |
| 3.2 – O Papel da Cana-de-Açúcar na Sociedade..... | 19 |
| 3.2.1 – Aspectos Sociais..... | 19 |
| 3.2.2 – Aspectos Econômicos..... | 20 |

| | |
|--|----|
| 3.2.3 – Aspectos Ambientais..... | 21 |
| 3.3 – Principais Produtos..... | 22 |
| 3.3.1 – Álcool..... | 22 |
| 3.3.2 – Açúcar..... | 23 |
| 3.3.3 – Energia..... | 24 |
| 3.4 – Resíduos da Cana-de-Açúcar..... | 25 |
| 3.4.1 – Cinza do Bagaço da Cana-de-Açúcar..... | 26 |
| | |
| 4 – PROGRAMA EXPERIMENTAL..... | 29 |
| 4.1 – Materiais..... | 29 |
| 4.1.1 – Cimento Portland..... | 29 |
| 4.1.2 – Agregado Miúdo..... | 30 |
| 4.1.3 – Água..... | 30 |
| 4.1.4 – Cinza do Bagaço da Cana-de-Açúcar..... | 30 |
| 4.2 – Métodos..... | 31 |
| 4.2.1 – Análise Térmica Diferencial..... | 32 |
| 4.2.2 – Perda ao Fogo..... | 32 |
| 4.2.3 – Calcinação..... | 33 |
| 4.2.4 – Análise por Difração de Raios X..... | 34 |
| 4.2.5 – Análise por Espectroscopia por Fluorescência de Raios X..... | 35 |
| 4.2.6 – Moagem..... | 36 |
| 4.2.7 – Granulometria..... | 36 |
| 4.2.8 – Massa Específica Real e Área Específica..... | 37 |
| 4.2.9 – Análise Microestrutural..... | 37 |
| 4.2.10 – Análises de Índice de Atividade Pozolânica..... | 38 |

| | |
|--|----|
| 4.2.11 – Método de Determinação de Atividade Pozolânica em Cimento Portland Pozolânico (NBR 5753, 1998)..... | 38 |
| 4.2.12 – Método Chappelle Modificado..... | 41 |
| 4.2.13 – Índice de Atividade Pozolânica (NBR 5752, 1992)..... | 41 |
| 4.2.14 – Ensaio de Resistência à Compressão em Corpos-de-Prova de Argamassas com CBCA..... | 42 |
| | |
| 5 – DISCUSSÃO DOS RESULTADOS..... | 43 |
| 5.1 – Análise Térmica Diferencial..... | 43 |
| 5.2 – Calcinação..... | 44 |
| 5.3 – Difração de Raios X..... | 45 |
| 5.4 – Espectroscopia por Fluorescência de Raios X..... | 50 |
| 5.5 – Granulometria..... | 51 |
| 5.6 – Massa Específica..... | 54 |
| 5.7 – Área Específica..... | 55 |
| 5.8 – Microscopia Eletrônica de Varredura..... | 56 |
| 5.9 – Método de Determinação de Atividade Pozolânica em Cimento Portland Pozolânico (NBR 5753, 1998)..... | 58 |
| 5.10 – Índice de Atividade Pozolânica (NBR 5752, 1992)..... | 64 |
| 5.11 – Ensaio Chappelle..... | 66 |
| 5.12 – Resistência Mecânica..... | 67 |
| | |
| 6 – CONSIDERAÇÕES FINAIS..... | 71 |
| 5.1 – Conclusões..... | 71 |
| 5.2 – Sugestões para Trabalhos Futuros..... | 72 |
| | |
| 7 – REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS..... | 75 |

LISTA DE FIGURAS

| | | |
|------------|--|----|
| Figura 2.1 | Pantheon, Roma (www.geneastar.org)..... | 06 |
| Figura 2.2 | Calor de hidratação em função da quantidade de pozolana (MASSAZA, <i>apud</i> METHA & MONTEIRO, 1994)..... | 09 |
| Figura 3.1 | Produção de cana-de-açúcar das safras de 1993 a 2003 (Revista ÁlcoolBRÁS, 2003)..... | 18 |
| Figura 3.2 | Evolução da produção de cana-de-açúcar nas usinas das regiões Norte e Noroeste do Estado do Rio de Janeiro (UDOP, 2005)..... | 19 |
| Figura 3.3 | Trabalhador rural (cortador de cana)..... | 20 |
| Figura 3.4 | Produção de álcool na safra 03/04 (UDOP, 2005)..... | 23 |
| Figura 3.5 | Produção de açúcar na safra 03/04 (Fonte: UDOP, 2005)..... | 24 |
| Figura 3.6 | Fluxograma simplificado da produção de CBCA..... | 27 |
| Figura 3.7 | Complexo agroindustrial da usina COAGRO: cana-de-açúcar sendo levada para moagem (a); pilha de estocagem de bagaço (b); CBCA dentro da fornalha da caldeira (c)..... | 28 |
| Figura 4.1 | Forno mufla..... | 33 |
| Figura 4.2 | Rampa de aquecimento..... | 34 |
| Figura 4.3 | Lâminas com CBCA para análises de “XRD”..... | 35 |
| Figura 4.4 | Equipamento Shimadzu EDX-700..... | 35 |
| Figura 4.5 | Moinho planetário (a); detalhe do porta-amostra (b)..... | 36 |
| Figura 4.6 | Sedimentação: amostras <i>in natura</i> (a); amostras calcinadas (b).. | 37 |

| | | |
|-------------|---|----|
| Figura 4.7 | Amostras de CBCA na estufa (a); amostra sendo filtrada (b)..... | 39 |
| Figura 4.8 | Titulação com ácido clorídrico (a); com permanganato de potássio (b)..... | 40 |
| Figura 4.9 | Isoterma de solubilidade..... | 40 |
| Figura 4.10 | Corpo-de-prova sendo rompido..... | 42 |
| Figura 5.1 | Análise térmica diferencial..... | 44 |
| Figura 5.2 | CBCA (COAGRO) antes da calcinação (a), após calcinação (b).. | 44 |
| Figura 5.3 | Difratogramas das CBCA <i>in natura</i> | 45 |
| Figura 5.4 | Difratogramas: CBCA da usina COAGRO após calcinação..... | 47 |
| Figura 5.5 | Difratogramas: CBCA da usina Paraíso após calcinação..... | 49 |
| Figura 5.6 | Curvas granulométricas da CBCA da COAGRO (sem moagem). | 52 |
| Figura 5.7 | Curvas granulométricas da CBCA da Paraíso (sem moagem)..... | 53 |
| Figura 5.8 | Curvas granulométricas da CBCA (COAGRO) calcinadas a 600°C/5h antes e após calcinação..... | 54 |
| Figura 5.9 | Morfologia das partículas de CBCA da usina Paraíso <i>in natura</i> com aumento de 200 vezes; com aumento de 500 vezes (b)..... | 56 |
| Figura 5.10 | Morfologia das partículas de CBCA (CORDEIRO, 2004)..... | 57 |
| Figura 5.11 | Morfologia das partículas de CBCA da COAGRO <i>in natura</i> [(a) e (b)] e após calcinação (600°C/5h) e moagem por 1h [(c) e (d)].... | 58 |
| Figura 5.12 | Resultado do ensaio proposto pela NBR 5753 (1998) – Cimento Portland..... | 60 |

| | | |
|-------------|--|----|
| Figura 5.13 | Resultados do ensaio proposto pela NBR 5753 (1998) – CBCA calcinada a 500°C (COAGRO)..... | 61 |
| Figura 5.14 | Resultados do ensaio proposto pela NBR 5753 (1998) – CBCA calcinada a 600°C (COAGRO)..... | 61 |
| Figura 5.15 | Resultados do ensaio proposto pela NBR 5753 (1998) – CBCA calcinada a 700°C (COAGRO)..... | 62 |
| Figura 5.16 | Resultados do ensaio proposto pela NBR 5753 (1998) – CBCA calcinada a 500°C (Paraíso)..... | 63 |
| Figura 5.17 | Resultados do ensaio proposto pela NBR 5753 (1998) – CBCA calcinada a 600°C (Paraíso)..... | 63 |
| Figura 5.18 | Resultados do ensaio proposto pela NBR 5753 (1998) – CBCA calcinada a 700°C (Paraíso)..... | 64 |
| Figura 5.19 | Índice de atividade pozolânica das CBCA (COAGRO) com cimento Portland. A linha tracejada indica o valor mínimo estabelecido pela NBR 12653 (1992)..... | 66 |
| Figura 5.20 | Evolução da resistência à compressão das argamassas (CBCA da usina COAGRO sem moagem)..... | 68 |
| Figura 5.21 | Evolução da resistência à compressão das argamassas (CBCA moída)..... | 69 |
| Figura 5.22 | Influência do teor de CBCA moída na resistência à compressão das argamassas..... | 70 |

LISTA DE TABELAS

| | | |
|------------|---|----|
| Tabela 2.1 | Classificação das pozolanas (NBR 12653, 1992)..... | 08 |
| Tabela 2.2 | Composição mineralógica de argamassas com CBCA obtida por difração de raios X (HERNÁNDEZ <i>et al.</i> , 1998)..... | 14 |
| Tabela 3.1 | Comparação das emissões de CO ₂ por diferentes combustíveis na geração de energia elétrica (FIESP/CIESP, 2001 <i>apud</i> CORDEIRO, 2004)..... | 21 |
| Tabela 3.2 | Resíduos gerados pela cana-de-açúcar (Adaptada de HEMERLY, 1999)..... | 26 |
| Tabela 4.1 | Composição química do cimento Portland CPIIE-32 e propriedades físicas..... | 30 |
| Tabela 4.2 | Temperaturas e tempos de calcinação das CBCA..... | 33 |
| Tabela 5.1 | Análise por espectroscopia por fluorescência de raios X (COAGRO)..... | 50 |
| Tabela 5.2 | Análise por espectroscopia por fluorescência de raios X (Paraíso)..... | 50 |
| Tabela 5.3 | Massa Específica (sem moagem)..... | 54 |
| Tabela 5.4 | Massa Específica (com moagem)..... | 55 |
| Tabela 5.5 | Área específica..... | 56 |
| Tabela 5.6 | Resultados do método proposto pela NBR 5753 (1998)..... | 59 |
| Tabela 5.7 | Dosagem de material para ensaio de índice de atividade pozolânica (NBR 5752, 1992)..... | 65 |
| Tabela 5.8 | Resultado do ensaio Chapelle..... | 67 |

| | | |
|-------------|---|----|
| Tabela 5.9 | Dosagem de material para ensaio de resistência à compressão simples de argamassas..... | 68 |
| Tabela 5.10 | Desvio padrão e coeficiente de variação da resistência mecânica das argamassas (CBCA sem moagem)..... | 71 |
| Tabela 5.11 | Desvio padrão e coeficiente de variação da resistência mecânica das argamassas (CBCA com moagem)..... | 71 |

RESUMO

A procura cada vez maior de produtos de consumo industrializados tem aumentado significativamente a demanda por matérias-primas, assim como a geração de resíduos sólidos. Este fato exige um gerenciamento eficaz dos resíduos para a minimização de seu impacto ambiental. A indústria da cana-de-açúcar no Município de Campos dos Goytacazes - RJ é uma atividade tradicional que produz grande quantidade de cinza do bagaço da cana-de-açúcar (CBCA) em suas sete unidades atualmente em funcionamento. A CBCA resulta da queima do bagaço de cana-de-açúcar nas fornalhas das caldeiras. Este trabalho visa ao estudo da potencialidade do emprego da cinza do bagaço da cana-de-açúcar na construção civil, por meio da pesquisa de suas características pozolânicas, uma vez que o aproveitamento deste produto em matrizes cimentícias representa uma boa alternativa para diminuição de gastos com locais para deposição do resíduo, evita a degradação do meio ambiente, além de garantir uma redução do consumo de cimento e, conseqüentemente, do preço do produto final.

Foi realizada uma série de ensaios de caracterização da CBCA. Iniciou-se pela análise térmica diferencial do material. Na seqüência, foram realizados ensaios incluindo análise granulométrica, composição química, composição mineralógica, atividade pozolânica e resistência mecânica (em argamassas com diversos teores de substituição de cimento por CBCA). A atividade pozolânica foi averiguada por meio de métodos propostos pela norma brasileira e pelo ensaio Chapelle. Foi realizado um estudo de temperatura e tempo ótimos de calcinação, uma vez que as cinzas, quando cristalinas, devem ser submetidas a um processo de calcinação adicional, a fim de se obter maior grau de amorficidade e, conseqüentemente, maior reatividade. A moagem também foi efetuada a fim de melhorar a reatividade da cinza.

Os resultados obtidos no programa experimental mostraram que a CBCA pode ser classificada como uma pozolana, desde que passe por um tratamento adequado (calcinação e moagem em determinados tempos). Além do efeito fíler, esta característica é decisiva para a contribuição na resistência mecânica da matriz e fundamental para a definição de um estudo mais detalhado objetivando seu emprego de forma satisfatória e sistemática na fabricação de argamassas.

ABSTRACT

The search bigger and bigger for industrialized products of consumption has increased the demand for raw material significantly, as well as the generation of solid residues. This fact requires an efficient management of the residues to minimize its ambient impact. In the district of Campos dos Goytacazes (RJ), the industry of sugar cane is a traditional activity that produces great amount of sugar cane bagasse ash (SCBA). The Sugar Cane Bagasse generated in the milling is used for burning in boilers, leading to sugar cane bagasse ash. The main objective of this study is to evaluate the practicability of the use of sugar cane bagasse ash in building construction through the determination of its pozzolanic activity (reactivity index) since this material does not possess specific destination, being the source of problem because of inadequate disposals. The utilization of this product in cementitious matrix eliminates the expenses with the residue disposals and prevents environmental degradation, besides being an indirect form of reduction of the cement consumption and the price of the final product.

Preliminary studies have shown the pozzolanic activity of this by-product, validating its use for partial substitution to the ordinary Portland cement. Therefore, an experimental program was carried out to determine the chemical, physical and mechanical characteristics of the sugar cane bagasse ash including granulometric distribution, chemical composition, pozzolanic reactivity and mechanical strength. The pozzolanic reactivity was evaluated by the ABNT and Chapelle methods. It was also studied the optimal temperature and burning time for the calcination, in order to get a greater degree of amorphousness and, consequently, reactivity. A grinding step allow an improvement of its reactivity.

The results we have obtained show that SCBA may be classified as pozzolan if undergone adequate thermal treatment and grinding. Besides its filler effect, the high pozzolanic index is crucial for the contribution in the matrix strength and fundamental to decide whether it is necessary a more detailed study aiming at a more systematic and satisfactory use of this ash in the manufacture of mortar.

1 – INTRODUÇÃO

A construção civil é certamente o maior gerador de resíduos de toda a sociedade. Também é responsável por entre 15 e 50% do consumo dos recursos naturais extraídos. Além de extrair recursos naturais, a produção de materiais de construção também gera poluição: poeira, CO₂ etc. O processo produtivo do cimento necessariamente gera CO₂, gás importante no efeito estufa. Para cada tonelada de clínquer produzido mais de 600 kg de CO₂ são gerados. As medidas de produção ambiental de outras indústrias e o crescimento da produção mundial de cimento fazem com que a participação do cimento no CO₂ total gerado tenha mais que dobrado no período de 30 anos, entre 1950 e 1980 (www.reciclagem.pcc.usp.br).

Milhares de toneladas de resíduos industriais e agrícolas gerados no processo de transformação de matérias-primas de diferentes segmentos são produzidas anualmente, sendo que atualmente a maioria destes materiais não possui aplicação específica e gera problemas de contaminação do meio ambiente devido a sua deposição desordenada. Nos países desenvolvidos existe uma tendência muito forte de regulamentar a questão da deposição dos resíduos no meio ambiente. As atividades da engenharia civil são grandes consumidoras de materiais de construção e, conseqüentemente, potenciais fontes de emprego de resíduos. Nos últimos anos, tem-se verificado um crescente número de trabalhos voltados para a utilização e o aproveitamento de resíduos industriais e agrícolas na produção de diversos materiais voltados para o setor da construção civil, como argamassas, blocos, painéis e concretos (FERREIRA *et al.*, 1997).

Sem qualquer sombra de dúvida, a maior experiência brasileira na área de reciclagem de resíduos gerados por outras indústrias na produção de materiais de construção civil é a conduzida pela indústria cimenteira, que recicla principalmente escórias de alto-forno e cinzas volantes (ÂNGULO *et al.*, 2001). YAMAMOTO *et al.* (1997) estimaram que em 1996 a indústria cimenteira brasileira ao adotar a reciclagem maciça de cinzas volantes e escórias granuladas de alto-forno, além da calcinação de argilas e adição de fíler calcário, reduziu a geração de CO₂ em 29%, além de proporcionar uma economia de combustível de 28%.

A questão ambiental, com a necessidade de minimização das emissões globais de CO₂, é um ponto favorável ao uso da biomassa, pois quando esta é queimada, CO₂ é liberado na atmosfera; entretanto, este gás é absorvido pelas plantas durante a fotossíntese, mantendo constante a sua quantidade na atmosfera (HOFFMANN *et al.*, 2002).

Na tentativa de minimizar o impacto causado por estas emissões, entrou em vigor em 16 de fevereiro de 2005 o Protocolo de Quioto. Este documento tem por objetivo reduzir o impacto negativo da civilização sobre a biosfera, fazendo diminuir o ritmo das incontestáveis mudanças do clima (DANILIAN, 2005).

Para incentivar o cumprimento do Protocolo foram criados os “créditos de carbono”, certificados emitidos por agências de proteção ambiental para os projetos das empresas que reduzem drasticamente as emissões de CO₂ - incluindo desde reflorestamentos até a substituição dos combustíveis fósseis por energias limpas a partir da biomassa (CHEVRAND, 2005).

A empresa que gera energia por meio de co-geração acaba emitindo menos poluentes do que nos casos da energia proveniente do petróleo, o que representa menos carbono na atmosfera. Com isto, ela receberá os “créditos de carbono”, que poderão ser comercializados no mercado com outras empresas, principalmente em outros países que são poluidores e que não adotaram sistemas para redução de poluentes e que, por isto, precisam pagar - como se fosse uma espécie de indenização - para quem está adotando projetos ecológicos (www.ambientebrasil.com.br).

No Brasil, maior produtor mundial de cana-de-açúcar, a co-geração nas usinas de açúcar e álcool é uma prática tradicional, produzindo-se entre 20 a 30 kWh por tonelada de cana moída, como energia elétrica e mecânica, esta última usada no acionamento direto das moendas (www.ambientebrasil.com.br).

O Protocolo de Quioto especifica que os países desenvolvidos reduzam suas emissões em 5% em relação aos níveis de poluição de 1990. Estas metas deverão ser atingidas no primeiro período de compromisso do Protocolo, entre 2008 e 2012 (CHEVRAND, 2005).

Países em desenvolvimento, como Brasil, China e Índia, grandes emissores de poluentes, podem participar do acordo, mas não são obrigados a nada. O

conceito básico acertado para Quioto é o da "responsabilidade comum, porém diferenciada" - o que significa que todos os países têm responsabilidade no combate ao aquecimento global, porém aqueles que mais contribuíram historicamente para o acúmulo de gases na atmosfera (ou seja, os países industrializados) têm obrigação maior de reduzir suas emissões (www.revistaepoca.com.br).

A co-geração de energia a partir do bagaço da cana-de-açúcar origina um resíduo, a cinza do bagaço, que tem papel importante no contexto da reciclagem. Destaca-se o papel das cinzas provenientes da casca de arroz, do carvão vegetal, do bagaço de cana-de-açúcar, da folha de milho etc. na construção civil.

Grande parte destas cinzas apresenta características pozolânicas, ou seja, mesmo sem ter, isoladamente, valor aglomerante, reagem, quando finamente moídas e em presença de água, com o hidróxido de cálcio $[Ca(OH)_2]$ para formar compostos aglomerantes (DAFICO *et al.*, 2003).

A reciclagem pode contribuir bastante com a diminuição das áreas destinadas à deposição de resíduos e dos custos que isto acarreta. A incorporação de resíduos na produção de materiais pode reduzir o consumo de energia para a produção do mesmo produto sem resíduos e, dependendo de onde esteja localizado o resíduo e seu mercado consumidor potencial, reduzir distâncias de transporte e contribuir para a redução da poluição gerada (AFONSO, 2005).

Com o objetivo de reduzir a geração de resíduos nos processos industriais e agrícolas, principalmente os poluentes, bem como melhor reaproveitá-los, seja no próprio processo produtivo ou como matéria-prima na elaboração de outros materiais, tem-se investido cada vez mais em pesquisas para a transformação destes, até então considerados apenas resíduos, em co-produtos de interesse comercial (DELLA *et al.*, 2001).

1.1 – Justificativa do Trabalho

A região Norte Fluminense é uma grande produtora de cana-de-açúcar. O bagaço da cana-de-açúcar é um subproduto primário da indústria sucroalcooleira, sendo reaproveitado como combustível para as caldeiras. Apesar do grande

potencial produtor de cinza do bagaço da cana-de-açúcar (CBCA), são escassos os trabalhos realizados com este resíduo no Brasil.

A Indústria da Cana de Açúcar (ICA) é, de acordo com dados obtidos junto ao Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE), um dos setores da agricultura que mais se destaca em área de plantio e produção. Estima-se que 14% dos solos cultivados no Brasil estejam ocupados com esta cultura (CALDAS *et al.*, 2000).

Atualmente sete usinas estão em funcionamento na região Norte Fluminense, apresentando o Estado do Rio de Janeiro uma média de 4,9 milhões de toneladas de cana moídas nas últimas doze safras, segundo informativo da Associação Fluminense dos Plantadores de Cana, Asflucan (FOLHA DA CANA, 2003).

Diante da possibilidade de utilização da CBCA em substituição parcial ao cimento Portland, em função de suas possíveis propriedades pozolânicas, faz-se necessário um estudo amplo de caracterização e avaliação de seu real potencial como matéria-prima para a produção de argamassas. Baseado neste uso potencial, este trabalho visa a suprir a carência de informações sobre a CBCA da região Norte Fluminense, além de possibilitar a criação de um banco de dados necessário para futuros estudos sobre possíveis aplicações deste resíduo no âmbito da construção civil.

1.2 – Objetivos

Esta dissertação tem como objetivo buscar melhores alternativas para o emprego da CBCA na construção civil, e contribuir para o desenvolvimento sustentável. Para tanto, pretende-se investigar as potencialidades de utilização da CBCA como parte integrante da produção de argamassas, por meio do desenvolvimento de uma metodologia apropriada e que se adapte à região Norte Fluminense, baseada no conhecimento da natureza do material e de suas propriedades físicas, químicas, mineralógicas e mecânicas.

1.3 – Estrutura da Dissertação

Para atingir os objetivos desta dissertação, este trabalho está estruturado em seis capítulos, com conteúdos necessários ao entendimento do tema e ao desenvolvimento de uma metodologia específica, bem como a discussão dos resultados obtidos com este estudo. Na Introdução destaca-se a relevância do desenvolvimento do trabalho e seus objetivos. Os demais capítulos estão organizados de forma a promover um maior conhecimento da CBCA, como mostrado a seguir:

- Capítulo 2: versa sobre os diversos tipos de materiais pozolânicos, suas classificações e forma de atuação na matriz cimentícia;
- Capítulo 3: faz um apanhado sobre a cana-de-açúcar, destacando sua origem e evolução; relata os diversos papéis que desempenha na sociedade; e, por fim, descreve seus produtos e subprodutos, com destaque para CBCA, alvo desta pesquisa;
- Capítulo 4: trata do programa experimental propriamente dito. Este capítulo envolve desde a coleta da matéria-prima (CBCA), sua caracterização física, química e mineralógica, até o tratamento específico para que a CBCA possa ser utilizada como material de construção. A metodologia é descrita por meio dos procedimentos de ensaio;
- Capítulo 5: dedicado à discussão dos resultados obtidos no programa experimental;
- Capítulo 6: refere-se às conclusões e sugestões para trabalhos futuros.

2 – MATERIAIS POZOLÂNICOS

O termo “pozolana” tem dois significados distintos. O primeiro refere-se às rochas encontradas próximas à região de Pozzouli (Roma) e ao redor de Roma. O segundo significado inclui todos os materiais inorgânicos, naturais ou artificiais, que endurecem na presença de água quando misturados com hidróxido de cálcio (cal) ou com materiais que podem liberar hidróxido de cálcio (clínquer de cimento Portland). Por um longo tempo o uso de pozolanas ficou restrito principalmente à Itália, onde consideráveis reservas de pozolanas naturais são encontradas, e à Grécia. Em outros países o interesse nestes materiais é relativamente recente e tem surgido na necessidade de reutilização de alguns resíduos como as cinzas volantes e o fumo de sílica (MASSAZZA, 1998).

A mais famosa construção de Roma erguida em concreto é o Pantheon (*Figura 2.1*), cujas paredes de até 6 m de espessura são de concreto composto de cinzas vulcânicas. O Pantheon foi construído de 118 a 126 d.C. e foi uma das poucas construções que resistiram íntegras depois do declínio do Império Romano (BLEZARD, 1998).



Figura 2.1 – Pantheon, Roma (www.geneastar.org)

2.1 – Definição

De acordo com a NBR 12653 (1992), “materiais pozolânicos são materiais silicosos ou silicoaluminosos que, por si sós, possuem pouca ou nenhuma atividade aglomerante, mas que, quando finamente divididos e na presença de água, reagem com o hidróxido de cálcio à temperatura ambiente para formar compostos com propriedades aglomerantes”.

Em geral, os materiais pozolânicos podem ter origem natural ou artificial. A NBR 12653 (1992) divide estes materiais pozolânicos em alguns grupos, a saber:

- Pozolanas naturais: materiais de origem vulcânica, geralmente de caráter petrográfico ácido (65% de SiO_2) ou de origem sedimentar com atividade pozolânica.
- Pozolanas artificiais: materiais resultantes de processos industriais ou provenientes de tratamento térmico com atividade pozolânica.
- Argilas calcinadas: materiais provenientes de calcinação de certas argilas submetidas a temperaturas, em geral, entre 500°C e 900°C, de modo a garantir sua reatividade com hidróxido de cálcio.
- Cinzas volantes: materiais finamente divididos que resultam da combustão de carvão pulverizado ou granulado com atividade pozolânica.
- Outros materiais: materiais não-tradicionais, tais como escórias siderúrgicas ácidas, cinzas de materiais vegetais e rejeitos de carvão mineral.

2.2 – Classificação

As pozolanas são classificadas em três classes segundo a NBR 12653 (1992), como é verificado na *Tabela 2.1*.

Tabela 2.1 – Classificação das pozolanas (NBR 12653, 1992).

| Classe | Características |
|--------|---|
| N | Pozolanas naturais e artificiais, como materiais vulcânicos, terras diatomáceas e argilas calcinadas. |
| C | Cinza volante produzida pela queima de carvão mineral. |
| E | Qualquer pozolana cujos requisitos diferem das classes anteriores. |

2.3 – Reação Pozolânica

Quatro compostos são usualmente considerados como os principais constituintes do cimento: C_3S^* (silicato tricálcico), C_2S (silicato dicálcico), C_3A (aluminato tricálcico) e C_4AF (ferroaluminato tetracálcico). Estes silicatos e aluminatos, em presença de água, formam produtos de hidratação que, com o transcorrer do tempo, dão origem a uma massa firme e resistente, a massa de cimento endurecida (NEVILLE, 1997).

De acordo com NEVILLE (1997), as reações de hidratação do cimento podem ser escritas por meio das seguintes equações:

Para o C_3S :



Para o C_2S :



Assim, a sílica amorfa presente na pozolana reage com o hidróxido de cálcio formando silicatos de cálcio hidratados, C-S-H (CORDEIRO, 2001). Esta reação é denominada reação pozolânica e ocorre basicamente da seguinte forma:



* Costuma-se, em química do cimento, adotar-se abreviações: C=CaO; S=SiO₂; A=Al₂O₃; F=Fe₂O₃; H=H₂O

De acordo com METHA & MONTEIRO (1994), a importância dos cimentos pozolânicos provém de três aspectos principais da reação pozolânica: a velocidade da reação, o consumo de hidróxido de cálcio e a distribuição dos tamanhos dos poros.

Primeiro, esta reação é geralmente lenta. Como consequência, tem-se que a taxa de liberação de calor e o desenvolvimento da resistência mecânica serão igualmente lentos (SANTOS, 1997). A *Figura 2.2* mostra o efeito da substituição parcial do cimento Portland por uma pozolana natural sobre o calor de hidratação.

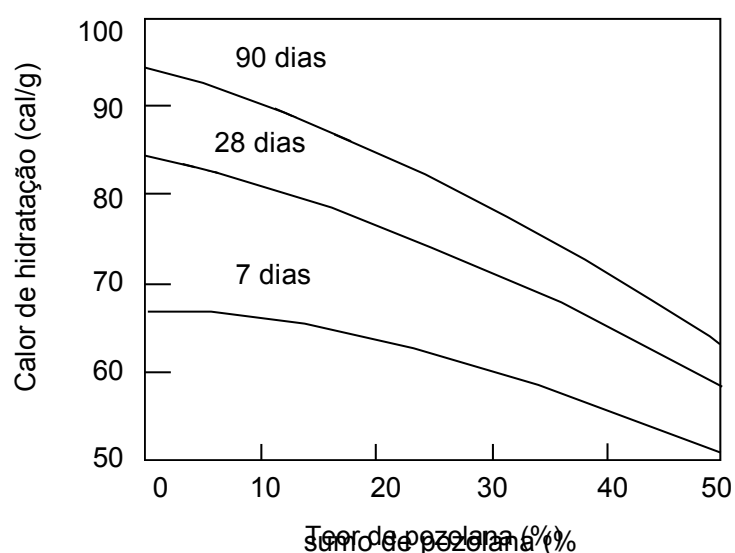


Figura 2.2 – Calor de hidratação em função da quantidade de pozolana (MASSAZA, 1998 *apud* METHA & MONTEIRO, 1994).

De acordo com AÏTCIN (2000), a hidratação do cimento Portland libera uma grande quantidade de cal como resultado da hidratação do C_3S e do C_2S (30% da massa do cimento anidro). Esta cal contribui muito pouco para a resistência mecânica da pasta de cimento hidratada e pode ser responsável por problemas de durabilidade, uma vez que pode ser lixiviada facilmente pela água. Esta lixiviação resulta em aumento de porosidade da matriz da pasta de cimento e, assim, em maior vulnerabilidade e assim por diante. Já a reação pozolânica consome hidróxido de cálcio ao invés de produzi-lo, contribuindo para o aumento da durabilidade da pasta endurecida.

Finalmente, com relação ao terceiro aspecto, estudos sobre a distribuição do

tamanho dos poros dos cimentos pozolânicos hidratados mostraram que os produtos da reação são bastante eficientes no preenchimento dos espaços capilares grandes, melhorando assim o desempenho (resistência mecânica e durabilidade) do produto final (METHA & MONTEIRO, 1994).

Os materiais pozolânicos, em geral, necessitam de um tratamento prévio para que seu uso se torne adequado, realizado por meio de um processo que vai desde a simples moagem até tratamentos térmicos.

Segundo NEVILLE (1997), é fundamental que a pozolana esteja finamente subdividida, pois somente assim a sílica pode reagir com o hidróxido de cálcio (liberado pela hidratação do cimento Portland) na presença de água para formar silicatos estáveis com propriedades cimentícias. Esta sílica deve estar no estado amorfo, isto é, vítreo, pois quando cristalina sua reatividade é muito baixa.

2.4 – O Papel das Pozolanas na Construção Civil

A busca por melhores materiais ou processos sempre levaram o homem à procura do novo, mas não necessariamente estas descobertas resultaram em um material revolucionário. Muitas destas descobertas aprimoraram ou re-introduziram novos produtos no mercado de materiais já conhecidos pelo homem. Isto se aplica perfeitamente aos materiais pozolânicos (ARAÚJO *et al.*, 2003).

Os materiais de construção têm sido avaliados não só de acordo com suas propriedades e seu desempenho; a forma como são produzidos e o impacto que este processo de produção, bem como o consumo de matérias-primas, geram sob o meio ambiente também têm sido alvo de muitas pesquisas.

O setor da construção civil é o que mais consome recursos naturais, de 20 a 50% do total explorado (DOMINGOS, 2003). O cimento Portland, um dos materiais mais utilizados na construção civil, é responsável por uma boa parcela deste consumo, uma vez que sua composição é basicamente de argila e calcário.

O processo de fabricação do cimento Portland requer um alto consumo energético, algo em torno de 4 GJ de energia por tonelada de produto acabado. Um esforço considerável vem sendo feito no sentido de minimizar este consumo por

meio do uso de pozolanas como substituto ao cimento Portland. Na busca da economia de energia, os subprodutos industriais e agrícolas vêm sendo uma boa opção para a indústria dos materiais cimentícios, já que se encontram facilmente disponíveis, exigem muitas vezes pouco beneficiamento, além de apresentarem propriedades cimentantes (SANTOS, 1997).

Adição de cinza pozolânica ao cimento Portland teve início na Europa na década de 50, como forma de dar um fim nobre às cinzas volantes de carvão mineral, produzidas nas usinas termoelétricas e, em contrapartida, diminuir os custos de produção do cimento. A cinza volante é, sem dúvida, a pozolana de maior uso devido a sua grande disponibilidade e baixo custo (SANTOS, 1997).

Um estudo desenvolvido por SANTOS & PRUDÊNCIO (1998) mostrou que a cinza volante após um período de moagem de 2 h apresentou índice de atividade pozolânica (IAP) superior a 75%, valor mínimo exigido pela NBR 12653 (1992).

A sílica ativa é outra pozolana bastante utilizada e que teve seu emprego registrado desde meados do século XX. Apesar da primeira utilização prática da sílica ativa ter sido relatada em 1952 por um pesquisador norueguês, BERNHARDT, foi somente ao final dos anos 70 que a sílica ativa começou a ser utilizada como um material cimentício suplementar na fabricação de concretos na Escandinávia. Foi somente no início dos anos 80 que ela começou a ser usada desta forma na América do Norte (AÏTCIN, 1983; MALHOTRA *et al.*, 1987).

De acordo com AÏTCIN (2000), as características peculiares que tornam a sílica ativa um material pozolânico muito reativo são o elevado teor de SiO_2 , o estado amorfo e a elevada finura.

As usinas siderúrgicas também contribuem nesta geração de materiais com propriedades cimentantes e potencial satisfatório para utilização como material de construção. A produção de escória de alto-forno, subproduto da produção do ferro-gusa em alto-forno, é de 7,5 milhões de toneladas por ano no Brasil (FIGUEIREDO *et al.*, 2002).

Um estudo desenvolvido por ESPER (1992), no qual foram analisadas argamassas com adições de escória, mostrou que, à idade de três dias, a resistência mecânica diminuiu com o aumento do teor de escória. Com o aumento da idade, foi possível observar um acréscimo de resistência mecânica. Esta tendência foi mais

pronunciada a partir de 14 dias, onde o cimento com 55% de escória apresentou ápice de resistências, resistências estas superiores inclusive às do cimento sem escória. Teores acima de 55% de escória apresentaram uma tendência de diminuição de resistência à compressão, muito embora esta tenha sido, em muitos casos, superior à resistência do cimento sem escória.

Os cimentos com alto teor de escória podem ser usados como cimentos de baixo calor de hidratação em estruturas nas quais devam ser lançadas grandes massas de concreto, de modo que seja necessário o controle da elevação de temperatura resultante do calor de hidratação despendido nas primeiras idades (NEVILLE, 1997).

YAMAMOTO *et al.* (1997) estimaram que em 1996 a indústria cimenteira brasileira ao adotar a reciclagem maciça de cinzas volantes e escórias granuladas de alto forno, além da calcinação de argilas e adição de filer calcário, reduziu a geração de CO₂ em 29%, além de proporcionar uma economia de combustível de 28%.

Outra pozolana que tem merecido papel de destaque no cenário nacional é a cinza de casca de arroz (CCA), a qual vem sendo intensamente investigada desde a década de 70, principalmente na Índia e nos EUA. Mas só a partir da década de 80, com o desenvolvimento da tecnologia do concreto de alto desempenho, que a preocupação em se obter um maior índice de pozolanicidade do material se tornou premente. A produção de CCA com elevada pozolanicidade tem possibilitado sua utilização no lugar da sílica ativa no concreto de alto desempenho (DAFICO, 2003).

A produção mundial de arroz está estimada em 500 milhões de toneladas por ano, sendo que o Brasil é o 8º produtor mundial (cerca de 11 milhões de toneladas anuais), precedido em ordem crescente pelo Japão, Burma, Vietnã, Tailândia, Bangladesh, Indonésia, Índia e China. Nos países onde se produz arroz, ou outros tipos de cereais que exigem beneficiamento, geralmente se utiliza a queima da casca destes grãos, muitas vezes a céu aberto, na tentativa de solucionar o problema da sua armazenagem (FERREIRA *et al.*, 1997).

Como material adicionado conjuntamente ao cimento Portland, muitas propriedades apresentadas pela cinza de casca de arroz têm sido reportadas por diversos pesquisadores (METHA & MONTEIRO, 1994). Com o concreto no estado

fresco, adições de materiais pozolânicos, tais como a CCA, têm a capacidade de reduzir a segregação e a exudação, e isto acarreta em grande melhoria da trabalhabilidade. Exceto a cinza de casca de arroz, nenhum outro material pozolânico, incluindo-se a sílica ativa, tem a habilidade de contribuir para o aumento na resistência mecânica do concreto em baixas idades, como 1 e 3 dias. Isto abre novas oportunidades para o uso de misturas de cinza volante e outras pozolanas normais com a CCA, com esta última agindo como acelerador de resistência mecânica (MEHTA & MONTEIRO, 1994).

Considerando a região Norte Fluminense, é dado destaque a dois materiais com propriedades cimentantes: argila calcinada e cinza do bagaço da cana-de-açúcar (CBCA). A argila calcinada foi objeto de diversos trabalhos de investigação e caracterização. CORDEIRO (2001) caracterizou uma pozolana produzida a partir da ativação térmica de uma argila caulínica extraída no Município de Campos dos Goytacazes-RJ. De acordo com CORDEIRO (2001), a substituição de cimento Portland por metacaulinita mostrou-se efetiva para fins de elevação da resistência à compressão de concretos e argamassas. As substituições de 10% e 15% apresentaram aumento, comparativamente ao concreto de referência, de aproximadamente 30% na resistência à compressão aos 28 dias. MOTHÉ (2004) desenvolveu uma pesquisa utilizando a fase metacaulinita, material que contém sílica e alumina em elevado estado de desordem, constatando que os melhores valores de atividade pozolânica para o material utilizado foram obtidos entre as temperaturas de calcinação de 490 e 700°C, ocorrendo o ápice em 700°C.

Apesar do histórico da cana-de-açúcar no município de Campos dos Goytacazes, a CBCA da região ainda é pouco explorada. Já é sabida a potencialidade das CBCA de outras regiões do Brasil e de outros países. A sua composição química, determinada por diversos autores, evidencia a grande presença de sílica: 72,7% (HERNÁNDEZ *et al.*, 1998); 63,2% (SINGH *et al.*, 2000); 75% (MASSAZA, 1998).

Conforme HERNÁNDEZ *et al.* (1998), em seu estudo desenvolvido com as CBCA de Cuba, os principais parâmetros que afetam a reatividade da CBCA são o grau de cristalinidade da sílica e a presença de impurezas, como carbono e material

não calcinado. Desta maneira as impurezas podem limitar o contato entre o CH e a sílica reativa para formar compostos estáveis.

Um estudo desenvolvido por SINGH *et al.* (2000) na Índia evidenciou a atividade pozolânica da CBCA. A resistência da argamassa contendo 10% de CBCA apresentou um ganho de resistência mecânica aos 7, 14 e 28 dias, superior à da argamassa de referência.

Segundo CALDAS *et al.* (2000), os resultados dos ensaios mineralógicos obtidos por HERNÁNDEZ *et al.* (1998), *Tabela 2.2*, sugerem a presença de produto hidratado estável (C-S-H) em pastas de CBCA e cal, comprovando a atividade pozolânica da primeira.

*Tabela 2.2 – Composição mineralógica de argamassas com CBCA obtida por difração de raios X (HERNÁNDEZ *et al.*, 1998).*

| Amostra | Idade | Fases detectadas |
|-------------------|---------|--|
| | | CBCA |
| Cinza original | — | Quartzo, cristobalita, calcita |
| Pastas hidratadas | 7 dias | Quartzo, cristobalita, calcita, C-S-H, portlandita |
| Pastas hidratadas | 28 dias | Quartzo, cristobalita, calcita, C-S-H, portlandita |
| Pastas hidratadas | 43 dias | Quartzo, cristobalita, calcita, C-S-H, portlandita |

De acordo com CALDAS *et al.* (2000), a incorporação da CBCA aumentou a compacidade da argamassa para todas as idades e teores de cinza (0, 1, 3, 5 e 10%), aumentou a resistência à compressão para valores de até 5% de incorporação e proporcionou uma queda na absorção em função do aumento do teor de cinza.

A cinza do bagaço da cana-de-açúcar (CBCA), por tratar-se do objeto desta dissertação, também será enfocada de maneira mais detalhada no Capítulo 3, sob os aspectos produtivos da região Norte Fluminense.

3 – CANA-DE-AÇÚCAR E SEUS PRINCIPAIS PRODUTOS E RESÍDUOS

A evolução da agroindústria canavieira está intimamente associada à história do Brasil e ao seu desenvolvimento. Em função da importância da cana-de-açúcar, não só sob o aspecto econômico, mas também social, a seguir será feito um breve apanhado de sua origem e desenvolvimento no cenário brasileiro. Os principais produtos e resíduos obtidos na ICA serão apresentados, dando destaque à cinza do bagaço da cana-de-açúcar (CBCA), resíduo cuja presente dissertação propõe-se a caracterizar a fim de investigar o seu potencial como material de construção.

3.1 – Histórico da Cana-de-Açúcar

3.1.1 – Origem

Assunto muito controvertido é o que define a idade da cana-de-açúcar no mundo – entre 12 e 6 mil anos atrás. O lugar onde a planta germinou pela primeira vez também é uma incógnita, devido à quantidade de gramíneas híbridas existentes e à falta de documentação que certifique sua origem. Uma linha de pesquisadores admite que a cana-de-açúcar tenha surgido na Polinésia; alguns arriscam a Papua Nova Guiné como berço da gramínea. Os estudiosos que admitem o surgimento da cana há 6 mil anos indicam a Indonésia, Filipinas e norte da África como expansão natural nos dois mil anos após o primeiro registro da planta (ÚNICA, 2004). A maioria dos historiadores, porém, aceita a tese de surgimento da cana entre 10 e 12 mil anos, e data em 3.000 a.C. o caminho percorrido pela cana da Península Malaia e Indochina à Baía de Bengala. Mas há um fato com o qual todos os historiadores concordam: a origem asiática da cana. Ela foi introduzida na China por volta de 800 a.C. e o açúcar cru já era produzido em 400 a.C. Porém, só a partir de 700 d.C. começou a ser comercializado (ÚNICA, 2004).

Contudo, foi a América que acolheu a cana-de-açúcar de forma definitiva. Em 1493, Colombo, em sua segunda viagem, trouxe mudas de cana-de-açúcar, plantou-as em São Domingos, e as lavouras estenderam-se a Cuba e outras Ilhas do Caribe (NOVA ENCICLOPÉDIA BARSA, 2000).

3.1.2 – Evolução da Cana-de-Açúcar no Brasil

Oficialmente, foi Martim Affonso de Souza que em 1532 trouxe a primeira muda de cana ao Brasil e iniciou seu cultivo na Capitania de São Vicente. Lá ele próprio construiu o primeiro engenho de açúcar, denominado de "Governador" e depois "São Jorge dos Erasmos". Mas foi efetivamente no Nordeste do Brasil, principalmente nas Capitanias de Pernambuco e da Bahia, que os engenhos de açúcar se multiplicaram (MACHADO, 2003).

Com o passar dos anos houve a expansão dos canaviais pela costa brasileira. A cultura canavieira progredia até meados do século XVII, quando em 1654 os holandeses, após passarem aqui um período de 24 anos, levaram o conhecimento e as técnicas do cultivo da cana para as Antilhas e para a América Central. Com isso, o açúcar brasileiro foi substituído no mercado europeu em virtude da localização das terras da América Central, mais próximas à Europa (ÚNICA, 2004).

Este quadro permaneceu até a segunda metade do século XVIII, quando a produção açucareira das Antilhas e da América Central foi seriamente prejudicada por agitações políticas e conflitos sociais, que levaram à independência das colônias européias nestas regiões, a que se acresceu o fato de os holandeses terem perdido o controle do comércio de açúcar na Europa. A abertura dos portos no Brasil, em 1808, e a independência, em 1822, também contribuíram para o Brasil recuperar o posto de maior produtor mundial de açúcar, situação esta que permaneceu por pouco tempo. Baixo nível técnico da produção, distância dos principais centros de consumo, significativa expansão do açúcar produzido da beterraba, progressivo aumento da cultura cafeeira, domínio da técnica de cristalização do açúcar por Cuba, levaram a que o Brasil despencasse de primeiro para quinto lugar entre os produtores mundiais de cana-de-açúcar, com menos de oito por cento do total, entre a segunda metade e o final do século XIX (ARBEX, 2001).

O imperador do Brasil, D. Pedro II, era um entusiasta das novas tecnologias e em 1857 foi elaborado um programa de modernização da produção de açúcar baseado em um novo conceito produtivo. Assim surgiram os Engenhos Centrais, que deveriam somente moer a cana e processar o açúcar, ficando o cultivo de cana exclusivamente por conta dos fornecedores. Nesta época, Cuba liderava a produção

mundial de açúcar de cana com 25% do total, e o açúcar de beterraba produzido na Europa e EUA significava 36% da produção mundial. O Brasil contribuía com apenas 5% de um total de 2.640.000 t de açúcar em 1874. Foram aprovados 87 Engenhos Centrais e efetivamente implantados 12 projetos. O primeiro deles, Quissaman, localizado em região próxima a Campos dos Goytacazes, entrou em operação em 1877 e esteve em atividade até 2003 (MACHADO, 2003).

Mesmo com as novas usinas em operação, não foi possível fazer frente à expansão do açúcar de beterraba, que por volta de 1900 ultrapassava mais de 50% da produção mundial. Mas novamente um fato histórico iria alterar este panorama, a eclosão da I Guerra Mundial em 1914, que provocou a devastação da indústria de açúcar européia, principalmente a do norte da França. Este fato provocou um aumento do preço do açúcar no mercado mundial e incentivou a construção de novas usinas no Brasil, notadamente em São Paulo, onde muitos fazendeiros de café desejavam diversificar seu perfil de produção. A produção do Nordeste somada à de Campos dos Goytacazes no Norte Fluminense e a rápida expansão das usinas paulistas acenavam para um risco eminente, a superprodução. Foi com o intuito de controlar a produção que surge então o IAA – Instituto do Açúcar e Alcool, criado pelo governo Vargas em 1933 (MACHADO, 2003).

O apoio do governo à produção de álcool se intensificou com as duas crises internacionais do petróleo, em 1973 e 1979. Em 1975, visando autonomia energética, o Brasil desenvolveu o Programa Nacional do Alcool (Proálcool). Em 1979, surgiu o carro a álcool brasileiro e com ele as raízes de um parque produtor com capacidade anual instalada de 18 bilhões de litros de etanol combustível, equivalente a 100 milhões de barris de gasolina por ano. O desenvolvimento de tecnologia específica conquistou os brasileiros e a frota nacional chegou a ser formada por 85% de veículos leves movidos a etanol, no final dos anos 80. A interferência estatal estava com os dias contados. Ao final dos anos 90, o mercado estava livre e, desde então, desenvolve sua auto-regulação (www.comciencia.com.br).

3.1.3 – A Cana-de-Açúcar nos Dias Atuais

Atualmente, o Brasil é o maior produtor mundial de cana-de-açúcar, açúcar e álcool, além de ser o maior exportador mundial de açúcar. Metade da produção brasileira é exportada, o que gerou, no ano 2000, 1,2 bilhões de dólares para a balança comercial. Há pelo menos cinco anos a Rússia é o maior cliente do Brasil. Planta-se cana no Centro-Sul e no Norte-Nordeste, o que permite dois períodos de safra (Única, 2004).

A *Figura 3.1* apresenta a evolução da produção de cana-de-açúcar no Brasil. De acordo com a Revista *ÁlcoolBRÁS* (2003), a safra de 03/04 gerou aproximadamente 350 milhões de toneladas de cana-de-açúcar. Houve um crescimento de 8,9% da produção em relação à safra anterior.

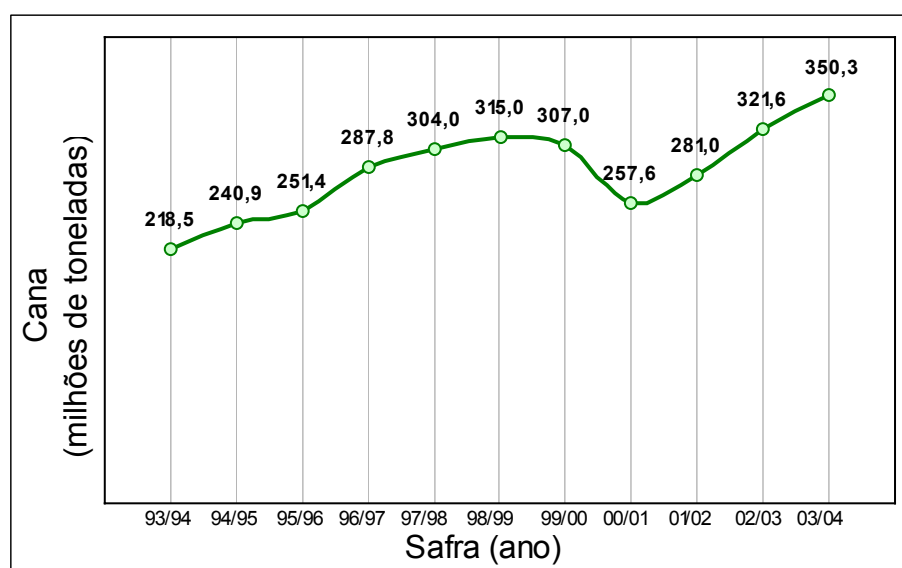


Figura 3.1 – Produção de cana-de-açúcar das safras de 1993 a 2003 (Revista *ÁlcoolBRÁS*, 2003).

A *Figura 3.2* mostra a evolução da produção de cana-de-açúcar nas Usinas das regiões Norte e Noroeste do Estado do Rio de Janeiro. A safra de 03/04 foi a maior dos últimos anos, totalizando aproximadamente 4,4 milhões de toneladas de cana nas sete unidades atualmente em funcionamento (Barcelos, COAGRO, Cupim, Paraíso, Pureza, Santa Cruz e Sapucaia). As usinas Carapebus e Quissaman

tiveram suas atividades encerradas nas safras de 01/02 e 02/03, respectivamente (FOLHA DA CANA, 2003).

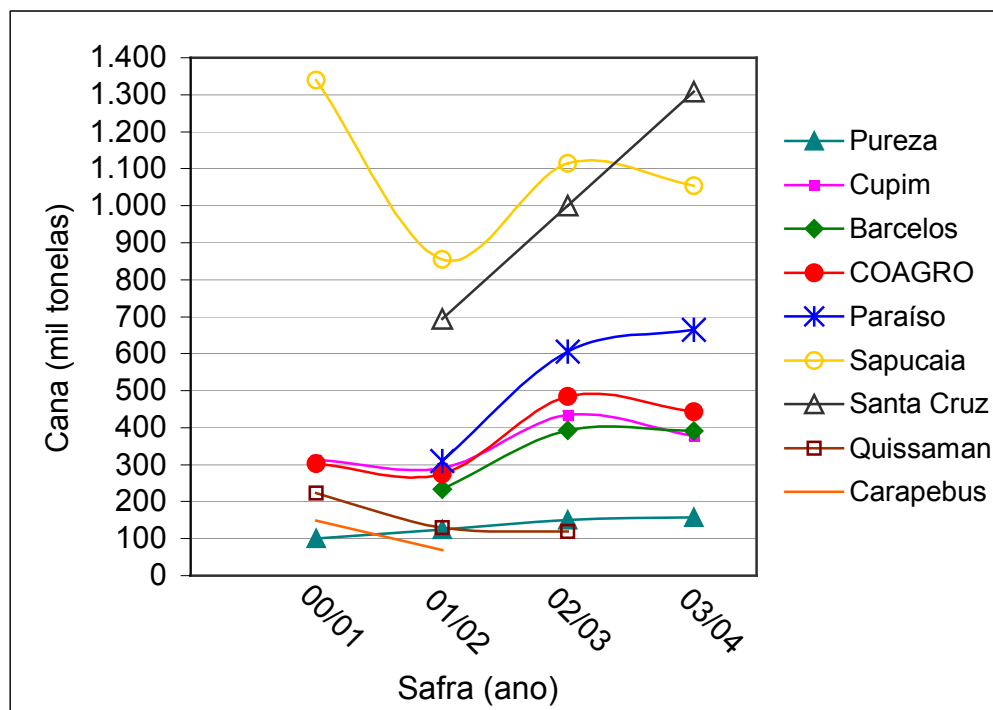


Figura 3.2 – Evolução da produção de cana-de-açúcar nas usinas das regiões Norte e Noroeste do Estado do Rio de Janeiro (UDOP, 2005).

3.2 – O Papel da Cana-de-Açúcar na Sociedade

3.2.1 – Aspectos Sociais

A cana-de-açúcar é uma cultura sazonal e, como tal, apresenta dificuldades peculiares. Os trabalhadores envolvidos neste processo têm seu meio de trabalho assegurado em apenas alguns meses do ano. Isto faz com que eles sejam obrigados a desempenhar atividades secundárias para seu sustento. Esta sazonalidade, muitas vezes, dificulta o emprego de uma mão-de-obra mais especializada, com programas de treinamento.

As condições de trabalho também são um fator de fundamental importância nesta atividade. A falta de utilização de equipamentos de proteção individual, como botas e luvas, as péssimas condições de alimentação, a extensa jornada de

trabalho, aliadas a uma fiscalização muitas vezes ineficiente tornam mais difíceis o trabalho na lavoura de cana-de-açúcar.

Segundo RIPOLI *et al.*(1995), enquanto no Brasil um trabalhador cortava, na década de 70, em média, 4-5 t/dia de 10h, em cana queimada, o cortador australiano atingia a média de 12-15 toneladas no mesmo período. A alimentação inadequada e a presença de mulheres e crianças entre os trabalhadores explicam esta diferença de desempenho no corte (HEMERLY, 1999).

A *Figura 3.3* ilustra um trabalhador rural no corte da cana-de-açúcar e evidencia a falta de proteção individual na realização desta atividade.



Figura 3.3 – Trabalhador rural (cortador de cana).

3.2.2 – Aspectos Econômicos

Embora as regiões Norte e Noroeste Fluminense apresentem uma estrutura fundiária característica da agricultura de subsistência, e sejam geralmente tratadas como atrasadas, estudos recentes demonstraram que nelas se desenvolve uma agricultura de caráter capitalista e mercantil, onde os aspectos econômicos são decisivos nesta atividade (MENDONÇA *et al.*, 1987, apud HEMERLY, 1999).

A cana-de-açúcar ainda é colhida de maneira tradicional, efetuando-se a queimada da lavoura e posterior corte manual. Apesar das vantagens de uma colheita mecanizada, como renovação do canavial em período maior de tempo e menos perda de nutrientes, esta prática apresenta uma série de dificuldades para ser implementada na região. Dentre os diversos fatores, podemos citar o preparo

adequado da área para possibilitar o emprego das máquinas e o alto investimento necessário para aquisição das mesmas, além, é claro, de uma especialização da mão-de-obra.

O agronegócio, segundo o atual ministro da Agricultura, Pecuária e Abastecimento, Roberto Rodrigues, é o mais importante setor da economia nacional, respondendo por 27% do PIB, gerando 37% do total dos empregos no Brasil e garantindo o saldo favorável da balança comercial brasileira (FOLHA DA CANA, 2003).

3.2.3 – Aspectos Ambientais

Devido à prática, nas regiões Norte e Noroeste do Estado do Rio de Janeiro, da queimada dos canaviais para facilitar a colheita manual da cana, há um agravamento dos danos ocasionados ao meio ambiente. Durante a queima são liberados CO₂, NO₂ e CH₄, gases estes que contribuem para o aumento do efeito estufa.

De acordo com CORDEIRO (2004), em contrapartida, o bagaço da cana-de-açúcar emite quantidades bem menores de CO₂ quando comparado a outros combustíveis na geração de energia elétrica (*Tabela 3.1*).

Tabela 3.1 – Comparação das emissões de CO₂ por diferentes combustíveis na geração de energia elétrica (FIESP/CIESP, 2001, apud CORDEIRO, 2004).

| Tipo de combustível | Emissões (kg CO ₂ /kWh) |
|---------------------|------------------------------------|
| Bagaço de cana | 0,057 – 0,11 |
| Madeira | 0,047 |
| Óleo combustível | 0,87 |
| Gás natural | 0,38 |

A cana-de-açúcar apresenta-se como uma fornecedora de combustível limpo. O maior diferencial ambiental do álcool está na origem renovável. É extraído da biomassa da cana-de-açúcar, com reconhecido potencial para seqüestrar carbono da atmosfera, o que lhe confere grande importância no combate global ao efeito estufa (ÚNICA, 2004).

Associando-se o uso da colheita mecanizada aos benefícios oriundos do álcool combustível, é possível a utilização desta matéria-prima com maiores benefícios para o meio ambiente e para a sociedade.

Outro aspecto a ser considerado é a geração de resíduos. A indústria da cana-de-açúcar gera diversos resíduos, como o bagaço, a palha da cana e a cinza do bagaço. O bagaço é utilizado nas caldeiras para co-geração de energia; a palha da cana é queimada na própria lavoura antes do corte e, portanto, não tem aproveitamento; e a cinza do bagaço é utilizada como fertilizante do solo, sem qualquer estudo de seus componentes e valor nutricional. Tendo em vista os usos mais comuns dados aos resíduos da cana-de-açúcar, faz-se necessário um estudo específico para uma aplicação mais apropriada dos mesmos.

3.3 – Principais Produtos

A cana-de-açúcar é uma matéria-prima de grande flexibilidade. Com ela é possível produzir açúcar e álcool de vários tipos; fabricar bebidas como cachaça, rum e vodka e gerar eletricidade a partir do bagaço via alcoolquímica. Da cana se aproveita absolutamente tudo: bagaço, méis, torta e resíduos de colheita. Com 3 kg de açúcar e 17,1 kg de bagaço pode-se obter, por exemplo, 1 kg de plástico biodegradável derivado da cana, utilizando-se como solventes outros subprodutos da usina (ÚNICA, 2004).

3.3.1 – Álcool

De acordo com dados da União da Agroindústria Canavieira de São Paulo (ÚNICA), na média, 55% da cana brasileira se transforma em álcool. O álcool anidro é misturado na proporção de 24% na gasolina em toda a frota brasileira, de 17 milhões de veículos. O álcool é também usado de forma intensiva na indústria de bebidas, nos setores químico, farmacêutico e de limpeza.

O Brasil exportou em 2004 quase três vezes mais álcool do que no ano anterior. Passou de 762,14 milhões de litros, em 2003, para 2,26 bilhões de litros em 2004, segundo a União da Agroindústria Canavieira de São Paulo.

Para 2005 as perspectivas são ainda mais animadoras. Com a ratificação do Protocolo de Quioto pela maioria dos países desenvolvidos e em desenvolvimento, o Brasil perseguirá a liderança mundial nas exportações do álcool combustível. A recente assinatura do Protocolo pela Rússia promoveu um forte impulso à adesão de outras nações. As regras do Protocolo têm o objetivo de limitar a emissão de gases poluentes responsáveis pelo excessivo aquecimento do planeta.

As usinas das regiões Norte e Noroeste do Estado do Rio de Janeiro totalizaram na safra de 03/04 aproximadamente 100 milhões de litros de álcool, como mostra a *Figura 3.4*.

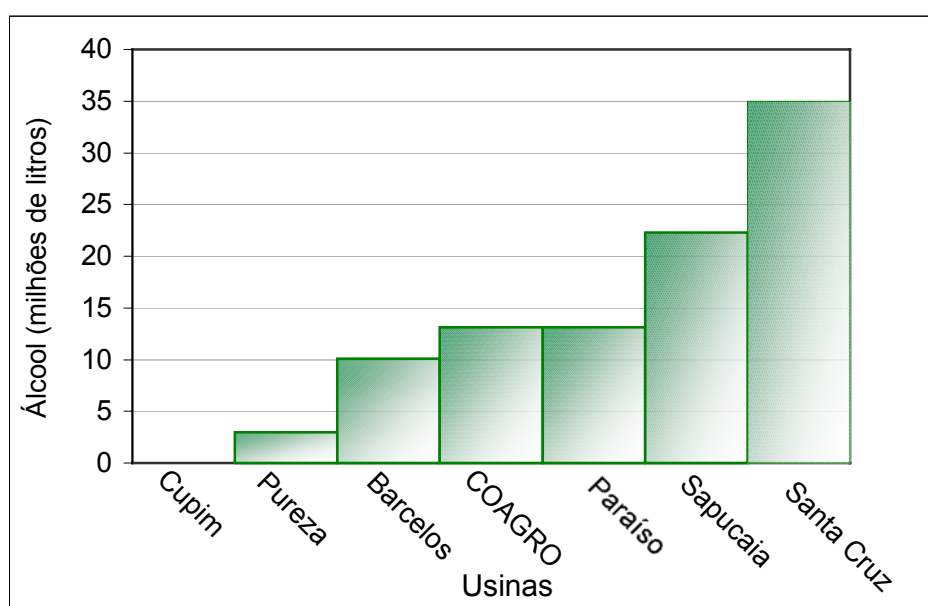


Figura 3.4 – Produção de álcool na safra 03/04 (UDOP, 2005).

3.3.2 – Açúcar

A princípio, o açúcar era empregado, quase que exclusivamente, na medicina. Mais tarde comprovaram-se suas qualidades de alimento fundamental, inteiramente

digestível pelo organismo humano, fonte de energia, constituindo ingrediente básico na formação de gordura (INMETRO, 1999).

Na média, 45% da cana brasileira se transforma em açúcar. Consomem-se a cada ano, no Brasil, 52 kg de açúcar per capita (a média mundial é de 22 kg), utilizando a cana plantada em 2,35 milhões de hectares de terra (ÚNICA, 2004).

A Figura 3.5 apresenta a produção de açúcar da safra de 03/04 das usinas das regiões Norte e Noroeste do Estado do Rio de Janeiro, que totalizou aproximadamente 330 mil toneladas.

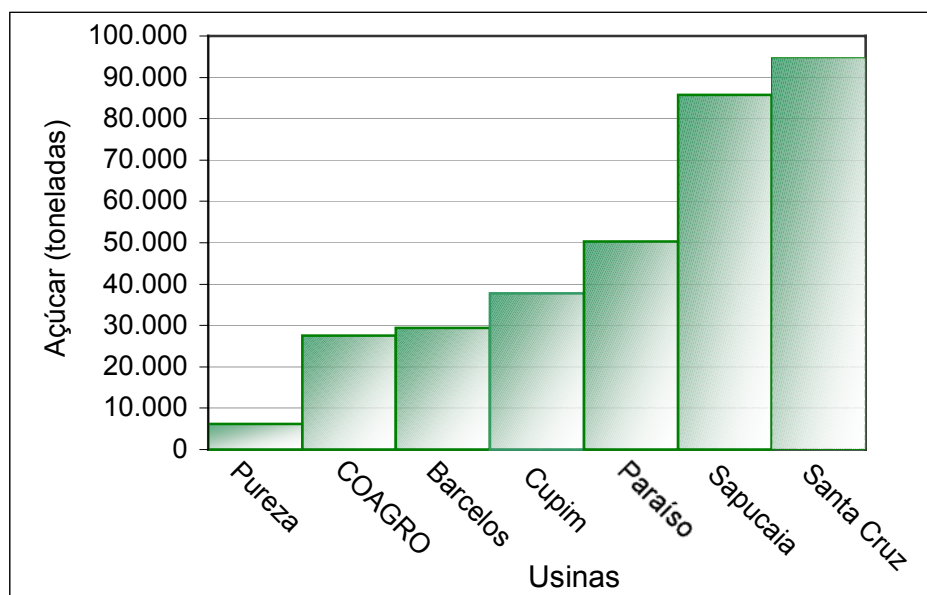


Figura 3.5 – Produção de açúcar na safra 03/04 (UDOP, 2005).

3.3.3 – Energia

No início da década de 40, a biomassa era responsável por cerca de 83% da Oferta Interna de Energia (OIE) do Brasil, dos quais 81% correspondentes à lenha e 2% a bagaço de cana. Com o uso crescente dos derivados de petróleo, logo acompanhados da grande expansão da hidroeletricidade, a participação da biomassa sofreu uma queda década após década. Em 1970, ano inicial da atual base de dados do Balanço Energético Nacional, a participação da biomassa já tinha caído para 47% da OIE (42% de lenha e 5% de bagaço). Enquanto a lenha foi sendo substituída por derivados de petróleo, principalmente por gás liquefeito de petróleo

(GLP) no setor residencial, o bagaço de cana foi aumentando sua importância na matriz energética em função do aumento das produções de açúcar e álcool, este último a partir de 1975 (PATUSCO, 1997).

A posição geográfica das usinas de cana-de-açúcar e o período de pico são pontos positivos que reforçam a viabilidade dos investimentos em co-geração. As usinas estão localizadas na área de maior consumo do país e o período de safra da cana coincide com a seca (maio a novembro), o que poderia ajudar a poupar os reservatórios das hidrelétricas (O ESTADO DE S. PAULO, 2004).

A cana-de-açúcar gera, portanto, assim como o petróleo, incontável número de produtos, de fermento a herbicidas e inseticidas, com importante diferencial: são biodegradáveis e não ofensivos ao meio ambiente (ÚNICA, 2004).

3.4 – Resíduos da Cana-de-Açúcar

A indústria da cana-de-açúcar gera muitos resíduos, que são utilizados em diversos fins. A *Tabela 3.2* apresenta alguns dos principais resíduos, sua origem e destino.

O bagaço da cana-de-açúcar é obtido durante processo de moagem da cana-de-açúcar para extração do caldo utilizado na produção de açúcar e álcool. Atualmente, cerca de 95% de todo bagaço produzido no país são queimados nas fornalhas das caldeiras das usinas para geração de vapor, enquanto os outros 5% são empregados como matéria-prima industrial na produção de outros materiais (FIESP/CIESP, 2001).

Sendo o estudo da CBCA, visando seu emprego como material de construção, o principal objetivo deste trabalho, a CBCA será enfocada mais detalhadamente no próximo item, destacando sua produção na região.

Tabela 3.2 – Resíduos gerados pela cana-de-açúcar (Adaptado de HEMERLY, 1999).

| Resíduo | Origem | Destino |
|--------------------|--|---|
| Bagaço | Moagem da cana e extração do caldo | <ul style="list-style-type: none"> - Co-geração de energia elétrica - Uso como adubo - Produção de ração animal - Produção de aglomerados - Produção de celulose |
| Torta de filtração | Filtração do lodo gerado na clarificação | <ul style="list-style-type: none"> - Uso como condicionador do solo - Produção de ração animal |
| Vinhoto | Resíduo da destilação do melaço fermentado (para obtenção do álcool) | <ul style="list-style-type: none"> - Uso como fertilizante |
| Melaço | Fabricação do açúcar | <ul style="list-style-type: none"> - Praticamente todo usado na produção do álcool |
| Ponta da cana | Corte da cana para moagem | ----- |
| CBCA | Queima do bagaço para co-geração de energia | <ul style="list-style-type: none"> - Adubação do solo |

3.4.1 – Cinza do Bagaço da Cana-de-Açúcar

A cinza do bagaço da cana-de-açúcar (CBCA) é obtida a partir da queima do bagaço nas fornalhas das caldeiras das usinas produtoras de açúcar e álcool. O fluxograma da *Figura 3.6* apresenta um esquema simplificado do processo de obtenção da CBCA.

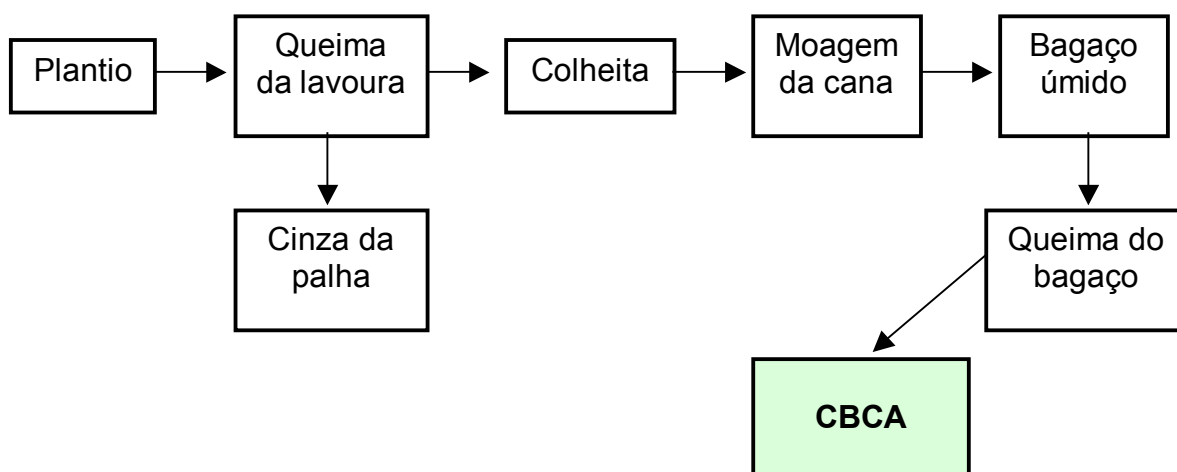


Figura 3.6 – Fluxograma simplificado da produção de CBCA.

Nas usinas, a cana é moída em grandes rolos de moendas de aço, sob grande pressão, sendo extraído o caldo para fabricação do açúcar e álcool. O bagaço separado nas moendas é usado como combustível nas caldeiras para a produção de vapor, usado para movimentar máquinas (CASTRO, 1995).

O bagaço de cana-de-açúcar representa de 26 a 33%, em massa, do total de cana moída (www.gmoravia.com.br). Considerando a produção da safra 03/04, 350,3 milhões de toneladas de cana, temos um quantitativo da ordem de 100 milhões de toneladas de bagaço. Este bagaço é utilizado para alimentar as fornalhas das caldeiras das usinas e, quando seco, gera um percentual em massa de 2,5% de cinza de bagaço de cana-de-açúcar (RODRIGUES, 2001) e, quando úmido, de 15% de cinza (METHA & MONTEIRO, 1994). Para a safra de 03/04 temos, então, um total de aproximadamente 16 milhões de toneladas de CBCA.

Normalmente a cinza residual é utilizada como adubo nas próprias lavouras de cana-de-açúcar, apesar de ser um material de difícil degradação e que apresenta poucos nutrientes minerais (MANHÃES, 1999, *apud* CORDEIRO, 2004).

A Figura 3.7 apresenta parte do Complexo Agroindustrial da Usina COAGRO.



(a)



(b)



(c)

Figura 3.7 – Complexo agroindustrial da usina COAGRO: (a) cana-de-açúcar sendo levada para moagem ; (b) pilha de estocagem de bagaço ; (c) CBCA dentro da fornalha da caldeira.

Como já mostrado na *Figura 3.2*, as usinas da região apresentaram uma produção total de cerca de 4,4 milhões de toneladas de cana. Considerando uma porcentagem média de bagaço de 29,5%, em massa, em relação à cana moída (www.gmoravia.com.br), e a porcentagem de cinza sugerida por METHA & MONTEIRO (1994), 15% em relação à massa do bagaço, temos um total de cerca de 195 mil toneladas de CBCA produzidas nas usinas da região Norte Fluminense.

4 – PROGRAMA EXPERIMENTAL

O programa experimental foi desenvolvido para alcançar os objetivos específicos desta dissertação, e consiste das seguintes etapas:

- Coleta das matérias-primas;
- Caracterização física, química e mineralógica das amostras *in natura*;
- Calcinação;
- Caracterização física, química e mineralógica das amostras calcinadas;
- Análise microestrutural;
- Caracterização dos demais materiais utilizados na confecção das argamassas;
- Análises de índice de atividade pozolânica e moagem;
- Ensaio de resistência à compressão em corpos-de-prova de argamassas com CBCA (cinza do bagaço da cana-de-açúcar);

Estes ensaios foram realizados nos Laboratórios de Engenharia Civil (LECIV), de Materiais Avançados (LAMAV), de Física (LCFIS), de Biologia (LBCT) e de Química (LCQUI), da Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro (UENF), no Instituto de Pesquisas Tecnológicas de São Paulo (IPT) e no Instituto Militar de Engenharia (IME).

4.1 – Materiais

4.1.1 – Cimento Portland

O cimento (*Tabela 4.1*) utilizado neste estudo foi o cimento Portland composto com adição de escória de alto-forno (CPIIE-32), da marca Votoran. O teor de escória é de 6 a 35%. Sua massa específica teórica foi determinada de acordo com as prescrições da NBR 6474 (1984) e sua área específica superficial, pelo permeabilímetro de Blaine (NBR NM 76, 1998).

Tabela 4.1 – Composição química do cimento Portland CPIIE-32 e propriedades físicas.

| Óxidos | Composição (%) |
|--------------------------------|------------------------|
| CaO | 63,2 |
| SiO ₂ | 20,2 |
| Al ₂ O ₃ | 8,5 |
| SO ₃ | 3,5 |
| Fe ₂ O ₃ | 2,3 |
| K ₂ O | 1,4 |
| Outros | 0,9 |
| Propriedades Físicas | |
| Massa específica | 2,92 g/cm ³ |
| Superfície específica (Blaine) | 342 m ² /Kg |

4.1.2 – Agregado Miúdo

Foi utilizada areia do rio Paraíba do Sul. Este material foi lavado e teve suas frações separadas, de modo a ser empregada a Areia Normal (NBR 7214, 1982) em todas as análises.

4.1.3 – Água

A água utilizada na confecção das argamassas foi proveniente da rede de abastecimento do município de Campos dos Goytacazes. Nos ensaios prescritos pelas NBR 5753 (1998), NBR 7181 (1984) e NBR 6508 (1984) utilizou-se água destilada.

4.1.4 – Cinza do Bagaço da Cana-de-Açúcar

As cinzas do bagaço da cana-de-açúcar foram coletadas em duas unidades industriais no Município de Campos dos Goytacazes-RJ: Usina COAGRO

(Cooperativa Agroindustrial do Estado do Rio de Janeiro), situada no distrito de Goytacazes, e Usina Paraíso, situada no distrito de Tocos. Foi utilizada a fração do material passante na peneira de abertura 0,075 mm (#200) para a realização dos diversos ensaios.

4.2 – Métodos

As duas amostras, das Usinas COAGRO e Paraíso, sofreram o mesmo tratamento. Inicialmente, as amostras foram submetidas ao quarteamento para homogeneização e, então, secas em estufa por um período de 24 horas.

Antes de se definir o programa experimental, foi realizada uma análise prévia das CBCA *in natura* por meio do índice de atividade pozolânica (IAP) utilizando-se o método proposto pela NBR 5752 (1992) e também a análise por difração de raios X. O IAP apresentou valores abaixo do mínimo estabelecido pela norma para classificação do material como pozolânico, e os difratogramas apresentaram picos bem acentuados, indicando a presença de material cristalino. Desta forma, optou-se por realizar um estudo de tempo e temperatura de calcinação, a fim de tornar o material mais reativo.

As cinzas foram submetidas à análise térmica diferencial a fim de se verificar as temperaturas nas quais ocorrem transformações de fase (transição vítrea) e, também, para nortear a faixa de temperatura na qual as amostras poderiam ser calcinadas.

Após realização da calcinação das CBCA, foi feita uma série de ensaios de caracterização: difração de raios X, espectroscopia por fluorescência de raios X, granulometria, massa específica e análise microestrutural.

Para a determinação da atividade pozolânica das amostras de CBCA calcinadas foi realizado o ensaio prescrito pela NBR 5753 (1998), “Método de Determinação de Atividade Pozolânica em Cimento Portland Pozolânico”, por tratar-se de um ensaio mais rápido, não só em tempo de preparo, como obtenção dos resultados (7 dias).

A fim de verificar a potencialidade do uso da CBCA na produção de argamassas, foi escolhida a amostra que apresentou maior amorficidade na análise por difração de raios X e maior pozolanicidade pelo método proposto pela NBR 5753 (1998) para realização dos demais ensaios, por ser considerada a mais reativa.

Com esta amostra foi realizado o IAP (NBR 5752, 1992). Como o resultado apresentado estava abaixo do mínimo prescrito pela norma, foi realizado um breve estudo de moagem da amostra selecionada, a fim de se obter um material que oferecesse melhores propriedades à argamassa. Em seguida foi determinada a superfície específica das amostras moídas.

O ensaio Chappelle foi utilizado apenas como método de confirmação da atividade pozolânica por apresentar um custo elevado, uma vez que a UENF não dispõe deste equipamento.

Após estas análises, foram realizados os ensaios de resistência mecânica.

A seguir serão detalhados os procedimentos de cada ensaio.

4.2.1 – Análise Térmica Diferencial

Para a realização da análise térmica diferencial, foi utilizado o equipamento DTA-50, da marca Shimadzu. As amostras foram aquecidas da temperatura ambiente até 750°C, a uma taxa de aquecimento de 20°C por minuto sob atmosfera de argônio.

4.2.2 – Perda ao Fogo

A perda ao fogo das cinzas provenientes das usinas COAGRO e Paraíso foi determinada de acordo com os procedimentos prescritos pela NBR 5743 (1989), cuja temperatura de residência no patamar de queima é $950 \pm 50^\circ\text{C}$.

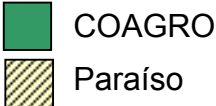
4.2.3 – Calcinação

A partir dos resultados obtidos pela análise térmica diferencial, foram escolhidos três temperaturas e tempos distintos de calcinação (*Tabela 4.2*).

O estudo de temperatura e tempo ótimos de calcinação foi efetuado uma vez que as cinzas, quando cristalinas, devem ser submetidas a um processo de calcinação adicional, a fim de se obter maior grau de amorficidade e, conseqüentemente, reatividade.

Tabela 4.2 – Temperaturas e tempos de calcinação das CBCA.

| Tempo no patamar (h) | Temperatura (°C) | | |
|----------------------|------------------|---------|--------|
| | 500 | 600 | 700 |
| 4 | COAGRO | Paraíso | COAGRO |
| 5 | COAGRO | Paraíso | COAGRO |
| 6 | COAGRO | Paraíso | COAGRO |



A calcinação foi realizada com a CBCA disposta em recipiente cerâmico (30cmx30cmx10cm), num forno mufla (*Figura 4.1*). O recipiente era preenchido até metade de sua capacidade a fim de obter uma calcinação mais eficiente.



Figura 4.1 – Forno mufla.

A *Figura 4.2* mostra a curva correspondente à rampa de aquecimento do forno. A CBCA era mantida dentro do forno até seu resfriamento a uma temperatura de aproximadamente 100°C, que durava, em média, 15 horas. Ao final deste processo foram obtidas 18 amostras calcinadas (9 de cada usina).

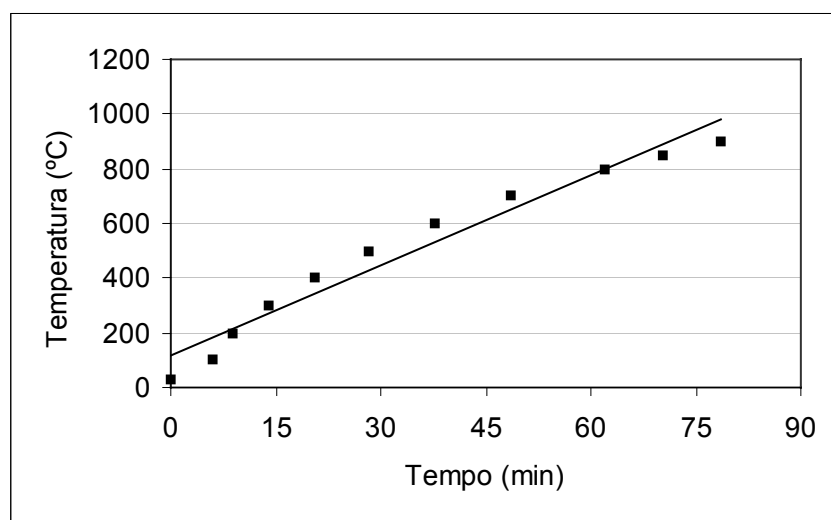


Figura 4.2 – Rampa de aquecimento.

Após o resfriamento, as cinzas foram armazenadas em recipientes com tampa para evitar umidade e, posteriormente, submetidas aos demais ensaios.

4.2.4 – Análise por Difração de Raios X

As características mineralógicas das CBCA foram determinadas por meio de difração de raios X (DRX) em um difratômetro Freiburger Präzisionsmechanick GmbH, modelo URD 65, com radiação $\text{Cu}_{K\alpha}$, operando a 35 kV e 40 mA. As CBCA foram secas em estufa a 110°C por um período de 24 horas; em seguida, foram preparadas lâminas com uma faixa de 1cmx1,5cm de amostra e com pequena espessura para serem submetidas às análises (*Figura 4.3*).

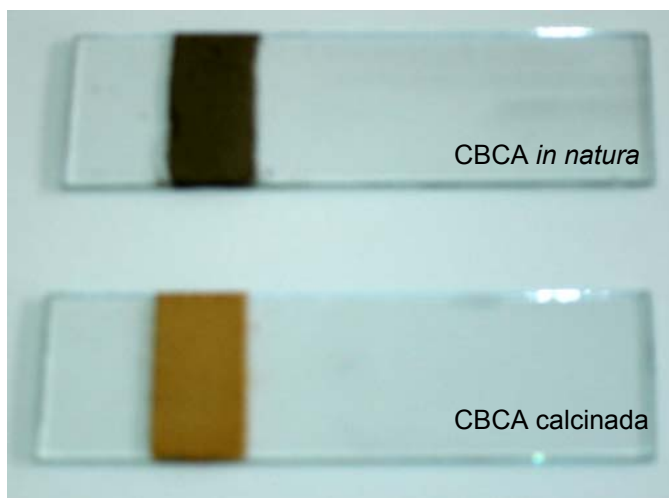


Figura 4.3 – Lâminas com CBCA para análises de DRX.

4.2.5 – Análise por Espectroscopia por Fluorescência de Raios X

A caracterização química foi realizada por meio de espectroscopia por fluorescência de raios X, num equipamento Shimadzu EDX-700 acoplado a um computador para o processamento dos dados (Figura 4.4). As amostras já passadas na peneira de abertura 0,075 mm (#200) foram secas em estufa a 110°C por um período de 24 horas, para em seguida serem submetidas ao ensaio, sob a forma de pó.



Figura 4.4 – Equipamento Shimadzu EDX-700.

4.2.6 – Moagem

Conforme descrito em Métodos (item 4.2), foi escolhida a cinza do bagaço da cana-de-açúcar calcinada a 600°C por 5 h para ser submetida a um processo de moagem num moinho planetário FRITSCH (*Figura 4.5*) por períodos de 30 min, 1 h, 2 h, 3 h e 4 h.

Para cada tempo de moagem foram utilizados 130 g de CBCA em cada porta-amostra do moinho.



(a)



(b)

Figura 4.5 – (a) Moinho planetário; (b) detalhe do porta-amostra.

4.2.7 – Granulometria

As características granulométricas das CBCA foram determinadas por meio de ensaios de sedimentação (*Figura 4.6*), conforme procedimentos indicados pela NBR 7181 (1984), uma vez que o material possui um diâmetro inferior a 0,075 mm. A partir dos resultados obtidos nestas análises, foram montadas as curvas granulométricas das CBCA.



(a)



(b)

Figura 4.6 – (a) Sedimentação amostras *in natura*; (b) amostras calcinadas.

4.2.8 - Massa Específica Real e Área Específica

As massas específicas das amostras foram obtidas segundo a NBR 6508 (1984), por meio de picnômetro. O mais indicado é a utilização do frasco de Le Chatelier, mas não foi obtido êxito com a utilização deste método, uma vez que ocorria a obstrução do frasco pela cinza. As áreas específicas foram determinadas pelo permeabilímetro de Blaine (NBR NM 76, 1998).

4.2.9 – Análise Microestrutural

A análise por microscopia eletrônica de varredura (MEV) foi realizada no microscópio Zeiss modelo DSM 962. O feixe de elétrons principal foi gerado por um filamento de tungstênio cuja tensão e corrente de operação foram, respectivamente, 10 – 15 kV e 50 μ A.

As CBCA foram secas em estufa a 110°C por um período de 24 h e, posteriormente, foram depositadas sobre um porta-amostra com o auxílio de uma fita dupla face de carbono. Em seguida, o porta-amostra foi submetido a uma deposição de ouro, sendo mantido em estufa até o momento da visualização no microscópio.

Foram analisadas as duas CBCA *in natura* (COAGRO e Paraíso) e a CBCA da COAGRO calcinada à temperatura de 600°C por 5 h e moída por 1 h.

4.2.10 – Análises de Índice de Atividade Pozolânica

A atividade pozolânica das CBCA foi determinada por meio de três métodos: os propostos pela NBR 5753 (1998), pela NBR 5752 (1992) e pelo Método Chapelle Modificado (RAVERDY *et al.*, 1980).

4.2.11 – Método de Determinação de Atividade Pozolânica em Cimento Portland Pozolânico (NBR 5753, 1998)

No método proposto pela NBR 5753 (1998), a atividade pozolânica é avaliada comparando-se a quantidade de hidróxido de cálcio presente na fase líquida em contato com a pasta de cimento hidratada com a quantidade de hidróxido de cálcio que poderia saturar um meio de mesma alcalinidade.

Foram utilizadas as CBCA calcinadas nos diversos tempos e temperaturas, das usinas COAGRO e Paraíso, e o cimento Portland CPIIE-32. Foi utilizado o cimento composto com a CBCA para transformá-lo em cimento pozolânico. A NBR 5736 (1998) especifica uma variação de 15 a 50%, em massa, da quantidade de pozolana adicionada ao cimento Portland. Para realização deste método, as amostras foram preparadas misturando-se CBCA e cimento Portland em duas proporções diferentes: na primeira foram utilizados 15% de CBCA e 85% de cimento; na segunda, 50% de CBCA e 50% de cimento. Estas misturas foram feitas para cada temperatura e tempo de calcinação, incluindo a amostra preparada só com cimento de referência, totalizando 37 análises. Este procedimento foi repetido e, então, obtida a média dos resultados.

A cada mistura foram adicionados 100 ml de água destilada à temperatura de 40°C; em seguida, foram agitadas energicamente por 20 segundos em recipiente plástico com tampa, e acondicionadas em estufa à temperatura de 40°C por um período de sete dias (*Figura 4.7a*). Transcorrido este período, as amostras foram filtradas a fim de retirar a fase líquida restante no recipiente plástico (*Figura 4.7b*).



Figura 4.7 – (a) Amostras de CBCA na estufa; (b) amostra sendo filtrada.

Em seguida, foi determinada a alcalinidade total (OH^-/L) do líquido (Figura 4.8a) por meio da titulação com ácido clorídrico (Equação 4.1). Quanto maior o consumo de ácido clorídrico, maior a alcalinidade do material.

$$\begin{aligned}
 &1 \text{ ml de solução } \text{HCl } 0,1 \text{ N} = 0,1 \text{ milimol de OH} \\
 &\text{milimol OH / litro} = \frac{\text{ml sol HCl} \cdot 0,1 \cdot 1000}{50} = \text{ml HCl} \cdot 2
 \end{aligned}
 \tag{4.1}$$

Com este mesmo líquido foi determinado o teor de óxido de cálcio (CaO/L) (Figura 4.8b), utilizando-se para isto a titulação com permanganato de potássio (Equação 4.2). Quanto maior o consumo de permanganato de potássio, maior o teor de CaO na solução.

$$\begin{aligned}
 &1 \text{ ml de solução } \text{KMnO}_4 \text{ } 0,05 \text{ N} = 0,025 \text{ milimol de CaO} \\
 &\text{milimol CaO / litro} = \frac{\text{ml sol KMnO}_4 \cdot 0,025 \cdot 1000}{50} = \frac{\text{ml KMnO}_4}{2}
 \end{aligned}
 \tag{4.2}$$

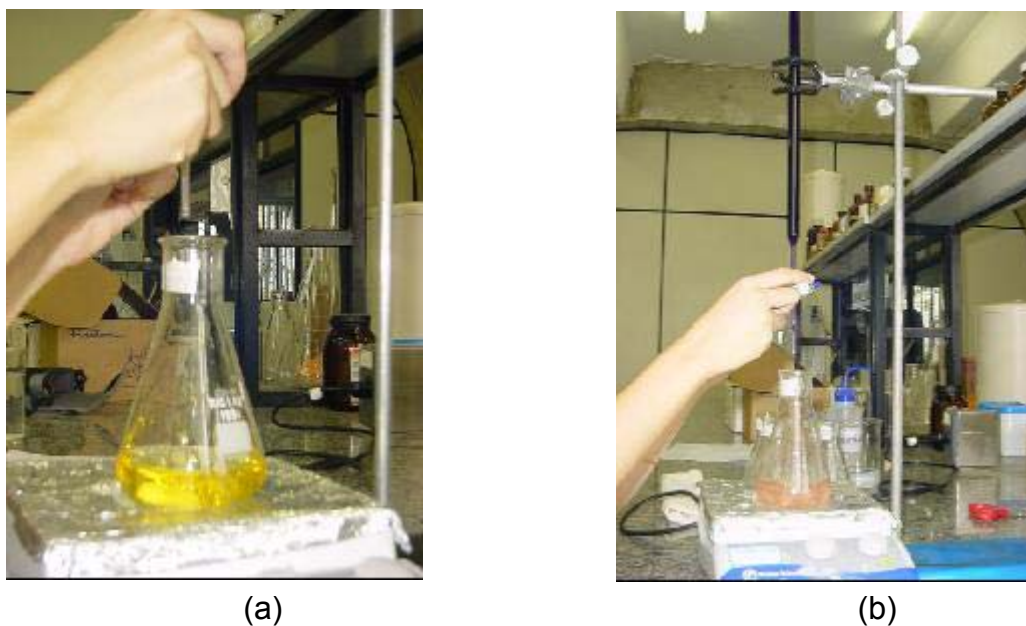


Figura 4.8 – (a) Titulação com ácido clorídrico; (b) com permanganato de potássio.

Quando o material está situado abaixo da isoterma proposta pela NBR 5753 (1998), o mesmo é classificado como pozolânico. O maior consumo de ácido clorídrico associado ao menor consumo de permanganato de potássio nas titulações possibilita situar o material numa região onde a pozolanicidade é maior (Figura 4.9).

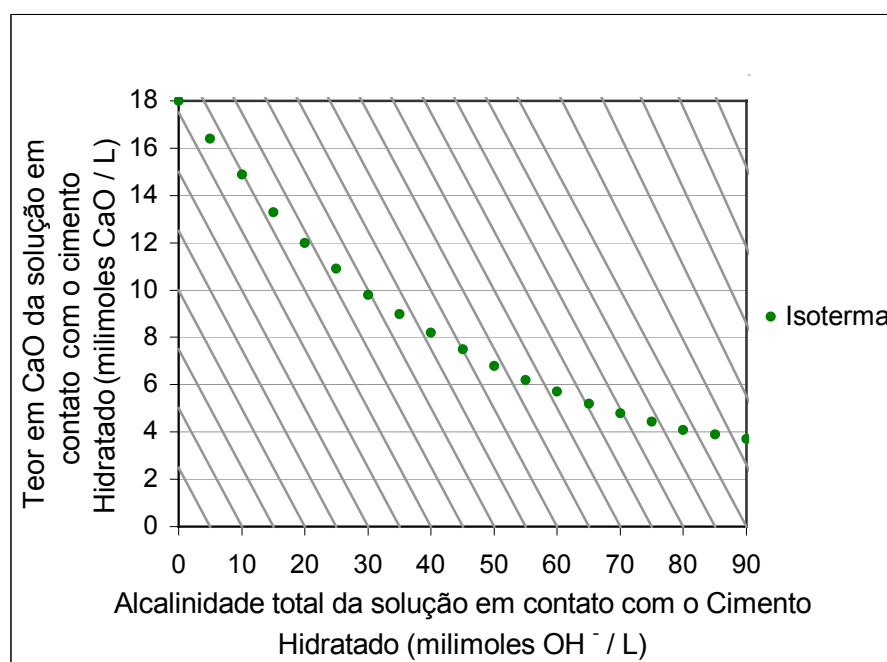


Figura 4.9 – Isoterma de solubilidade.

4.2.12 – Método Chappelle Modificado

Neste método, o resultado é expresso pela quantidade de óxido de cálcio consumido ou fixado por grama de material pozolânico (mg CaO/g pozolana) .

O Método Chappelle Modificado permite caracterizar uma pozolana, na sua finura de utilização pela taxa de reação da cal, após um tempo de contato padronizado, sendo a reação acelerada por elevação da temperatura, ou seja, uma determinada quantidade de material supostamente pozolânico e de CaO são colocados para reagir na presença de água fervente (100°C), pois a reação é muito lenta à temperatura ambiente (duração em torno de duas semanas). A mistura é mantida reagindo por algumas horas (em geral 16 horas). Após este tempo, a quantidade de CaO livre é determinada por meio de extração de sacarose e titulação com solução de HCl. Quanto maior o consumo de CaO, mais pozolânico é o material (MOTHÉ, 2004).

4.2.13 – Índice de Atividade Pozolânica com cimento Portland (NBR 5752, 1992)

Este método consiste na comparação das resistências à compressão aos 28 dias de duas argamassas de traço 1:3 (cimento:areia Normal). A primeira argamassa é produzida apenas com cimento Portland; já a segunda, com uma substituição de 35% do cimento pela CBCA. A consistência destas argamassas deve ser de 225 ± 5 mm, obtida por meio do ensaio na mesa de consistência.

Após o preparo das argamassas, foram moldados três corpos-de-prova de cada tipo de argamassa, e mantidos num ambiente à temperatura de $23 \pm 2^\circ\text{C}$ por 24 horas. Em seguida, os corpos-de-prova foram desmoldados e mantidos em ambiente fechado a uma temperatura de $38 \pm 2^\circ\text{C}$ por 27 dias. Foram utilizados corpos-de-prova cilíndricos com 5 cm de diâmetro e 10 cm de altura. Transcorrido este período, os corpos-de-prova foram submetidos à ruptura à compressão simples (*Figura 4.10*) numa prensa Versa Tester com capacidade de carga de 250 kN e taxa de carregamento de 0,5 MPa/s. Foram utilizadas amostras de CBCA calcinadas a 600°C por 5 horas sem moagem (passada na peneira #200) e moídas nos tempos

de 30 min, 1 h, 2 h, 3 h e 4 h, além das argamassas de referência (sem substituição por CBCA) e com a CBCA (COAGRO) sem calcinar (passada na peneira #200), totalizando 24 corpos-de-prova.



Figura 4.10 – Corpo-de-prova sendo rompido.

4.2.14 – Ensaio de Resistência à Compressão em Corpos-de-Prova de Argamassas com CBCA

A fim de verificar o comportamento, sob o aspecto da resistência mecânica, foram moldados corpos-de-prova cilíndricos (ϕ 5cm, altura 10cm) com teores de 0, 5, 10, 15 e 20% de substituição do cimento Portland pela CBCA. Foi utilizado o traço de 1:3 (aglomerante:areia), de argamassa Normal, o mesmo empregado na determinação da atividade pozolânica (NBR 5752, 1992). Foram confeccionados dois lotes de argamassas: o primeiro com a CBCA calcinada a 600°C por um período de 5 h; e o segundo com a CBCA calcinada neste mesmo tempo e temperatura e moída por 1 h, por apresentar um maior grau de amorficidade, comprovado pelas análises por difração de raios X e pela atividade pozolânica segundo as normas NBR 5753 (1998) e NBR 5752 (1992). Os teores de água foram determinados por meio da consistência padrão, segundo a NBR 13276 (1995). A cura dos corpos-de-prova se deu em laboratório à temperatura de $23 \pm 2^\circ\text{C}$ e umidade relativa do ar de $65 \pm 5\%$. Foram confeccionados 4 corpos-de-prova para cada porcentagem de substituição e cada idade de ruptura (7, 14 e 28 dias), totalizando 120 corpos-de-prova para os dois lotes. Foi utilizado o mesmo equipamento e a mesma taxa de carregamento empregados no IAP.

5 – DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

Neste capítulo são apresentados e discutidos os resultados obtidos no programa experimental, destacando as características da cinza do bagaço da cana-de-açúcar relevantes para sua utilização como material pozolânico na construção civil.

5.1 – Análise Térmica Diferencial (ADT)

A curva ADT da CBCA da usina COAGRO (*Figura 5.1*) apresentou um pico situado próximo a 60°C, que caracteriza a perda de água livre. O outro pico proeminente, situado em torno de 500°C, é característico da combustão do carbono, confirmando sua presença já evidenciada pela coloração escura da cinza.

A *Figura 5.1* apresenta a curva ADT da CBCA proveniente da usina Paraíso, que também revelou um pico endotérmico situado próximo a 50°C, caracterizando a perda de água livre do material.

A sílica é um dos minerais mais puros que se encontram na natureza, a forma mais comum da sílica é o quartzo, porém, outras formas polimórficas são encontradas na natureza, tais como tridimita e cristobalita (PUKASIEWICZ, 2001). A forma mais estável na temperatura ambiente é o quartzo α . O quartzo α transforma-se em quartzo β a 573°C e permanece estável até 870°C (ERNST, 1971, *apud* DAFICO, 2003). Portanto, o pico exotérmico situado próximo a 570°C, da CBCA da usina Paraíso, indica que além da combustão do carbono, pode estar formando o polimorfo β do quartzo. O pico situado a aproximadamente 330°C revela a presença de carbonato de potássio.

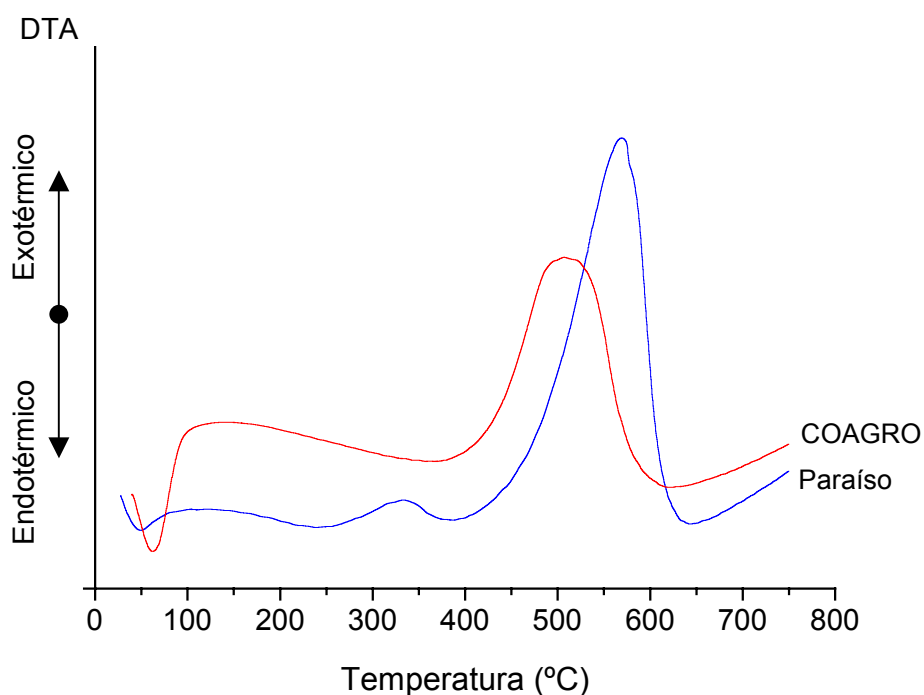


Figura 5.1 – Análise térmica diferencial.

5.2 – Calcinação

As cinzas provenientes das usinas COAGRO e Paraíso sofreram um processo de calcinação adicional em laboratório, apresentando mudança de cor. Após a calcinação as CBCA tornaram-se mais claras, como é possível observar na Figura 5.2. Esta mudança de coloração evidencia a presença de matéria orgânica devido à calcinação ineficiente nas fornalhas das caldeiras das usinas.

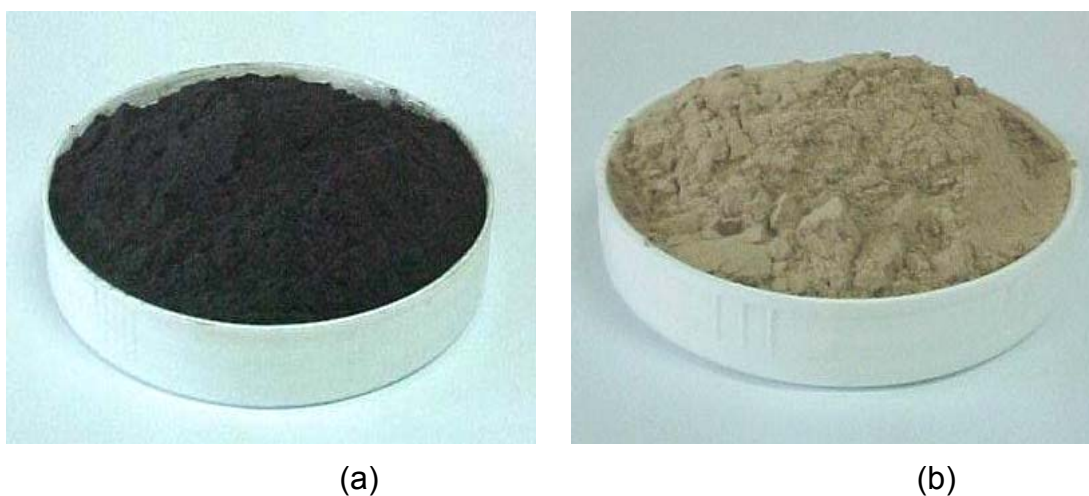


Figura 5.2 – (a) CBCA (COAGRO) antes da calcinação, (b) após calcinação.

A calcinação adicional das CBCA em laboratório possibilitou a obtenção de uma cinza mais homogênea.

As CBCA das usinas COAGRO e Paraíso apresentaram valores reduzidos de perda ao fogo (NBR 5743,1989), 1% e 0,9%, respectivamente. Estes valores foram semelhantes aos obtidos para as cinzas estudadas por HERNÁNDEZ *et al.*(1998), 0,8%, e MASSAZA (1998), 0,9%.

5.3 – Difração de Raios X

A análise por difração de raios X (“XRD”) possibilitou a identificação das fases cristalinas constituintes de ambas as CBCA. A *Figura 5.3* apresenta o difratograma das cinzas sem calcinação adicional, apenas secas em estufa a 110°C por 24 h, que revelou a presença de políformos da sílica.

Ambas as CBCA *in natura* apresentaram quantidades elevadas de quartzo, que reduz a reatividade da pozolana em razão deste mineral ser uma fase inerte do ponto de vista pozolânico. Para utilização deste material, visando melhorar suas propriedades pozolânicas, é necessária a transformação desta sílica cristalina em sílica amorfa, por ser mais reativa. Este processo de transformação pode ser obtido por meio da calcinação, como explicado no item 5.1.

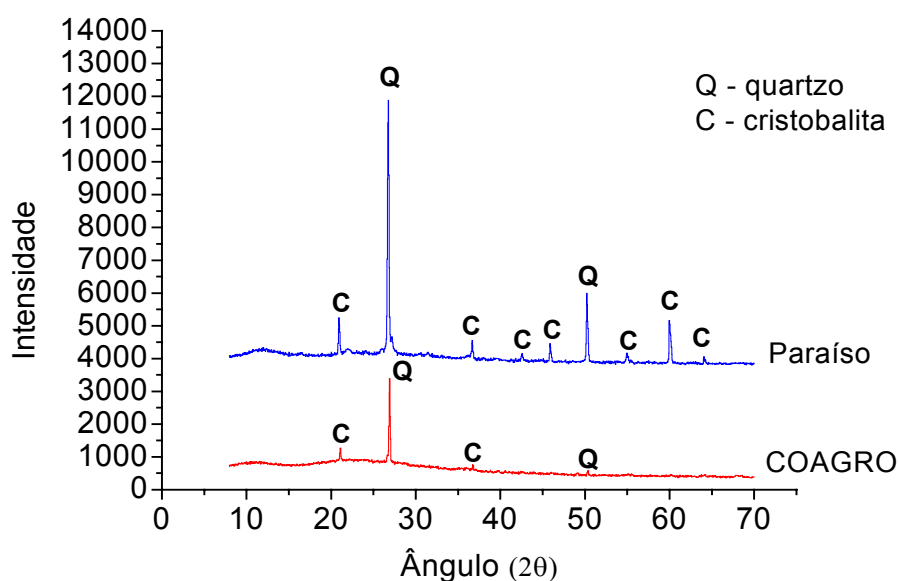


Figura 5.3 – Difratogramas das CBCA in natura.

A *Figura 5.4* apresenta os difratogramas das CBCA da COAGRO calcinadas nas temperaturas de 500, 600 e 700°C em três tempos distintos (4, 5 e 6 h cada). O processo de calcinação possibilita a queima de orgânicos, eliminação de carbonatos e a eliminação da água estrutural.

As cinzas calcinadas à temperatura de 500°C (*Figura 5.4a*) permaneceram com quantidades de sílica na forma cristalina semelhantes à CBCA *in natura*.

A CBCA calcinada a 600°C por 5 h (*Figura 5.4b*) apresentou halos mais difusos, com picos bem menos acentuados (quartzo) e até mesmo com a eliminação da maioria dos picos. As CBCA calcinadas à temperatura de 700°C apresentaram os picos cristalinos proeminentes novamente (*Figura 5.4c*).

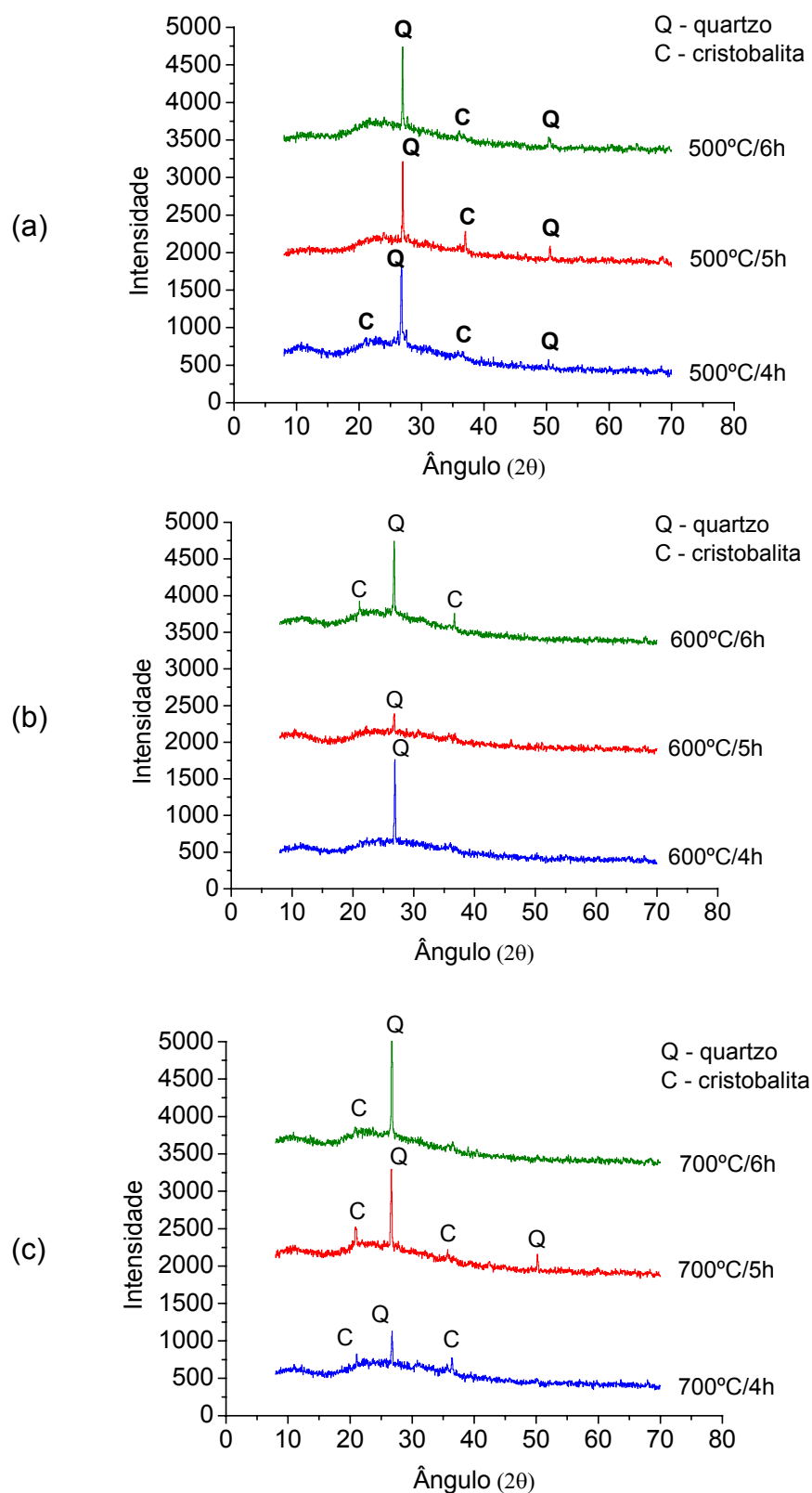


Figura 5.4 – Difratoogramas: CBCA da usina COAGRO após calcinação.

Os difratogramas das cinzas provenientes da usina Paraíso (*Figura 5.5*) revelaram que, mesmo após o processo de calcinação, a diminuição dos picos cristalinos foi insignificante.

Apesar da forma mais estável, à temperatura ambiente, ser o quartzo α e este se transformar em quartzo β a 573°C, não foi observada a redução considerável da intensidade dos picos de quartzo nas amostras da CBCA da Paraíso com o aumento da temperatura de calcinação.

A temperatura de 600°C foi a que apresentou melhores resultados, onde os picos mais acentuados, característicos do quartzo, possuíam as intensidades um pouco menores que as apresentadas pelas outras temperaturas.

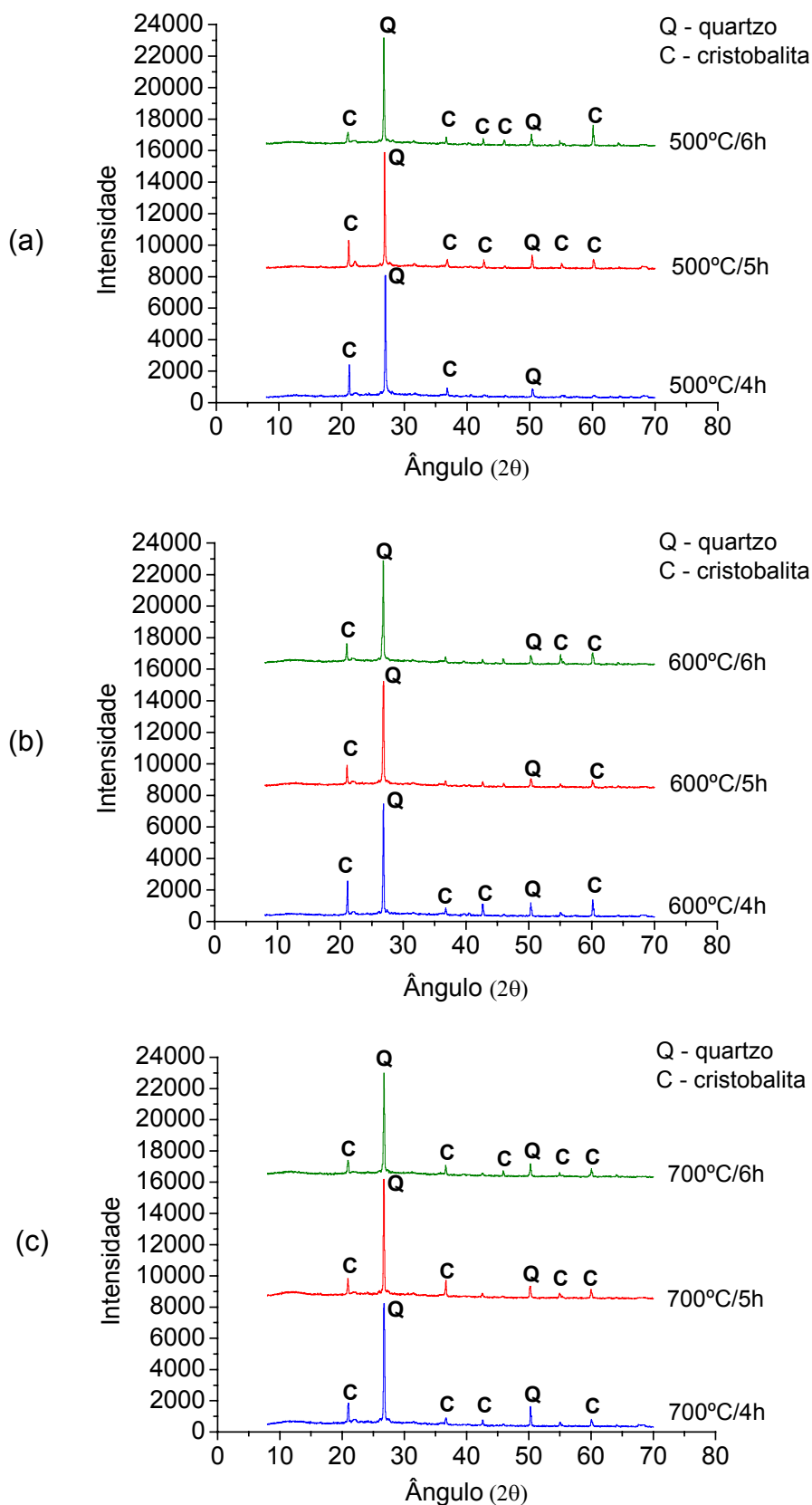


Figura 5.5 – Difratoformas: CBCA da usina Paraíso após calcinação.

5.4 – Espectroscopia por Fluorescência de Raios X

As composições químicas obtidas por espectroscopia por fluorescência de raios X (“EDX”) das CBCA das usinas COAGRO e Paraíso são apresentadas nas Tabelas 5.1 e 5.2. As CBCA provenientes das duas usinas apresentaram somas dos percentuais de SiO₂, Fe₂O₃ e Al₂O₃, para as cinzas sem calcinar e calcinadas nos diversos tempos e temperaturas estudados, superiores a 80%, valores estes que superam o valor mínimo de 70% para materiais pozolânicos (NBR 12653, 1992). O percentual de SO₃ para todas as amostras também satisfaz o valor máximo de 4% exigido pela NBR 12653 (1992).

Tabela 5.1 – Análise por espectroscopia por fluorescência de raios X (COAGRO).

| Óxidos | (%) | | | | | | | | | |
|--------------------------------|--------------|-------|------|------|-------|------|------|-------|------|------|
| | Sem Calcinar | 500°C | | | 600°C | | | 700°C | | |
| | | 4h | 5h | 6h | 4h | 5h | 6h | 4h | 5h | 6h |
| SiO ₂ | 65,7 | 67,8 | 67,4 | 67,5 | 67,3 | 69,7 | 67,1 | 67,7 | 67,7 | 67,0 |
| Al ₂ O ₃ | 13,8 | 14,9 | 14,7 | 14,8 | 14,6 | 12,9 | 14,4 | 14,4 | 14,6 | 14,7 |
| K ₂ O | 8,1 | 7,3 | 7,4 | 7,4 | 7,5 | 7,6 | 7,4 | 7,4 | 7,5 | 7,6 |
| Fe ₂ O ₃ | 4,1 | 3,3 | 3,3 | 3,4 | 3,4 | 3,5 | 3,4 | 3,3 | 3,3 | 3,3 |
| CaO | 3,5 | 3,0 | 3,0 | 3,0 | 3,1 | 2,6 | 3,1 | 2,9 | 3,1 | 3,1 |
| SO ₃ | 2,4 | 1,7 | 1,8 | 1,7 | 1,9 | 1,5 | 2,0 | 1,9 | 1,6 | 2,1 |
| Outros | 2,4 | 2,0 | 2,4 | 2,2 | 2,2 | 2,2 | 2,6 | 2,4 | 2,2 | 2,2 |

Tabela 5.2 – Análise por espectroscopia por fluorescência de raios X (Paraíso).

| Óxidos | (%) | | | | | | | | | |
|--------------------------------|--------------|-------|------|------|-------|------|------|-------|------|------|
| | Sem Calcinar | 500°C | | | 600°C | | | 700°C | | |
| | | 4h | 5h | 6h | 4h | 5h | 6h | 4h | 5h | 6h |
| SiO ₂ | 83,1 | 76,1 | 77,4 | 76,9 | 77,3 | 76,0 | 78,6 | 77,6 | 77,9 | 77,0 |
| Al ₂ O ₃ | 5,1 | 6,9 | 6,8 | 7,4 | 7,5 | 7,3 | 7,4 | 7,1 | 7,3 | 6,9 |
| K ₂ O | 4,5 | 7,3 | 7,1 | 7,0 | 6,9 | 7,0 | 6,3 | 6,8 | 6,5 | 6,8 |
| Fe ₂ O ₃ | 2,6 | 3,2 | 3,1 | 2,9 | 3,0 | 3,2 | 3,0 | 3,2 | 3,1 | 3,5 |
| CaO | 1,9 | 2,6 | 2,4 | 2,5 | 2,4 | 2,6 | 2,1 | 2,6 | 2,3 | 2,6 |
| SO ₃ | 2,1 | 2,0 | 1,7 | 1,7 | 1,3 | 1,8 | 1,2 | 1,9 | 1,6 | 1,9 |
| Outros | 0,7 | 1,9 | 1,5 | 1,6 | 1,6 | 2,1 | 1,4 | 0,8 | 1,3 | 1,3 |

Segundo CORDEIRO (2004), o quartzo apresenta-se como o principal contaminante da cinza do bagaço da cana-de-açúcar. O teor de sílica mais elevado na CBCA da usina Paraíso (*Tabela 5.2*) em relação à COAGRO (*Tabela 5.1*) pode ser justificado por uma maior contaminação por areia. A presença em maior quantidade deste mineral também foi detectada nas análises por difração de raios X.

A análise química revelou que as CBCA possuem de 65 a 85% de SiO₂, cuja média dos valores deste intervalo (75%) aproxima-se dos 73% encontrados por HERNÁNDEZ *et al.* (1998). A CBCA pode ser classificada como sílico-aluminosa. Segundo AMORIM *et al.* (1999), este teor de sílica é considerado elevado, fato desejável quando a sílica e/ou silicato de alumínio encontra-se em estado amorfo, pois ao longo do tempo têm-se reações que formam silicatos de cálcio hidratados, importantes para resistência mecânica de pastas, argamassas e concretos.

A presença de Al₂O₃ pode estar formando silicato de alumínio amorfo, contribuindo também para uma maior reatividade da cinza.

5.5 – Granulometria

As curvas granulométricas obtidas por meio do ensaio de sedimentação para a CBCA da usina COAGRO, após calcinação, apresentaram configuração semelhante. A *Figura 5.6* mostra as curvas granulométricas das CBCA da usina COAGRO sem moagem, obtidas de acordo com o procedimento da NBR 7181 (1984).

A CBCA *in natura* (sem calcinar) apresentou D₅₀ (tamanho abaixo do qual se situam 50% da massa do material) igual a 0,0174 mm e as CBCA calcinadas tiveram D₅₀, em média, igual a 0,0147 mm, evidenciando a presença de uma quantidade maior de grãos com diâmetros menores nas amostras calcinadas (*Figura 5.6*). A ativação térmica promove a quebra de ligações, diminuindo, assim, o tamanho da estrutura das partículas.

A CBCA *in natura* apresentou coeficiente de não uniformidade* igual a 8,4, enquanto as cinzas calcinadas apresentaram a média dos valores de coeficiente de

não uniformidade igual a 11,4 (Figura 5.6). Quanto maior o coeficiente de não uniformidade, mais contínua é a granulometria.

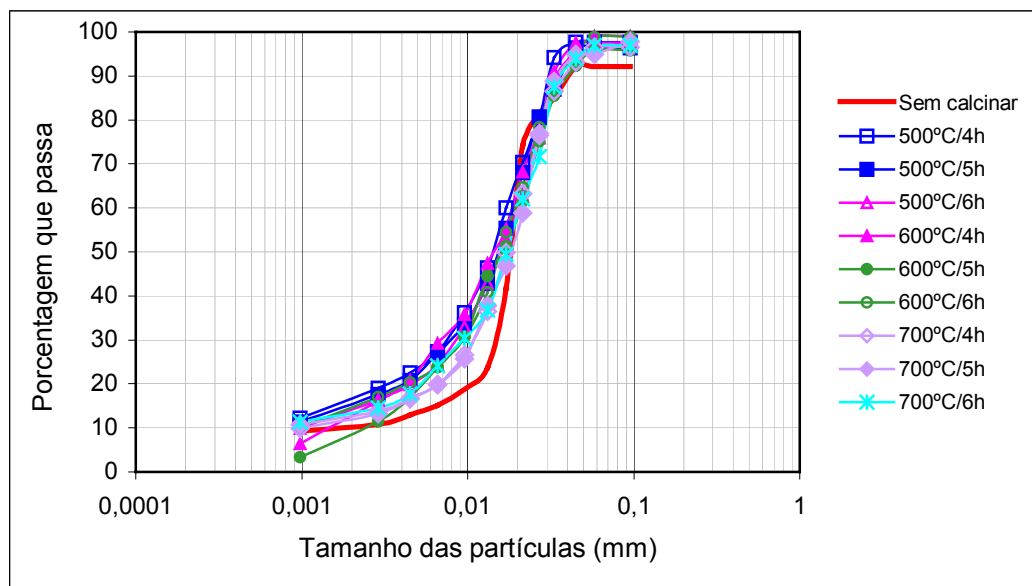


Figura 5.6 – Curvas granulométricas da CBCA da COAGRO (sem moagem).

A CBCA proveniente da usina Paraíso (Figura 5.7) apresentou pouca variação na forma das curvas granulométricas após o processo de calcinação. No entanto, o coeficiente de não uniformidade da cinza *in natura* foi igual a 7,0, enquanto as cinzas calcinadas apresentaram a média dos valores de coeficiente de não uniformidade igual a 11,3.

As CBCA calcinadas da usina Paraíso apresentaram uma redução no D_{50} pouco significativa em relação à CBCA *in natura*. O D_{50} da cinza *in natura* foi igual a 0,0334 mm, enquanto as CBCA calcinadas tiveram D_{50} , em média, igual a 0,0312 mm, sendo, portanto, mais insensível à calcinação na diminuição das partículas.

* O coeficiente de não uniformidade é definido pela relação $CNU = D_{60}/D_{10}$, onde “D sessenta” é o diâmetro abaixo do qual se situam 60% em peso das partículas e, analogamente, “D dez” é o diâmetro que, na curva granulométrica, corresponde à porcentagem que passa igual a 10% (PINTO, 2000).

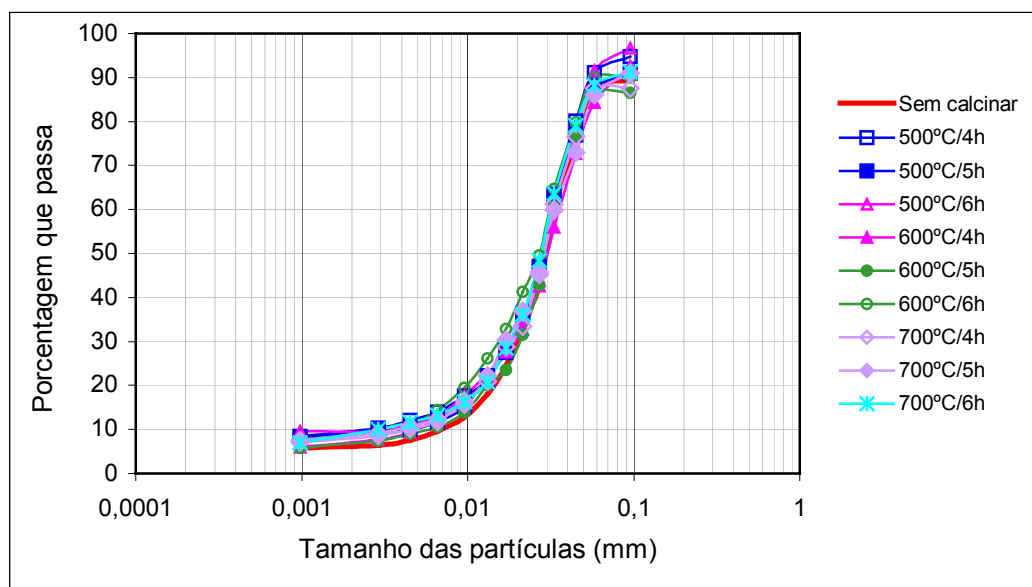


Figura 5.7 – Curvas granulométricas da CBCA da Paraíso (sem moagem).

O D_{50} da CBCA da COAGRO foi menor que o D_{50} da CBCA da Paraíso, mesmo após calcinação. A maior finura da cinza é importante para a obtenção de uma maior atividade pozolânica do material.

A moagem foi realizada para a cinza da COAGRO calcinada a 600°C/5h por ter apresentado um valor de IAP inferior ao mínimo estabelecido pela NBR 5752 (1992), conforme exposto no Capítulo 4. A moagem teve por objetivo a obtenção de uma cinza com um número maior de partículas com menor diâmetro e, conseqüentemente, mais reativa.

O aumento no tempo de moagem (Figura 5.8) propiciou a diminuição das partículas de CBCA. Além disto, o processo de moagem realizado com a CBCA da usina COAGRO possibilitou a obtenção de uma cinza com média de coeficiente de não uniformidade igual a 16,4 e, conseqüentemente, mais bem graduada que a CBCA sem moagem.

Esta redução no tamanho das partículas calcinadas e moídas também pode ser evidenciada por meio do D_{50} , que foi menor para todos os tempos de moagem. O D_{50} para os tempos de 30 min, 1 h, 2 h, 3 h e 4 h foram, respectivamente, 0,0085 mm, 0,0058 mm, 0,0050 mm, 0,0037 mm e 0,0033 mm (Figura 5.8).

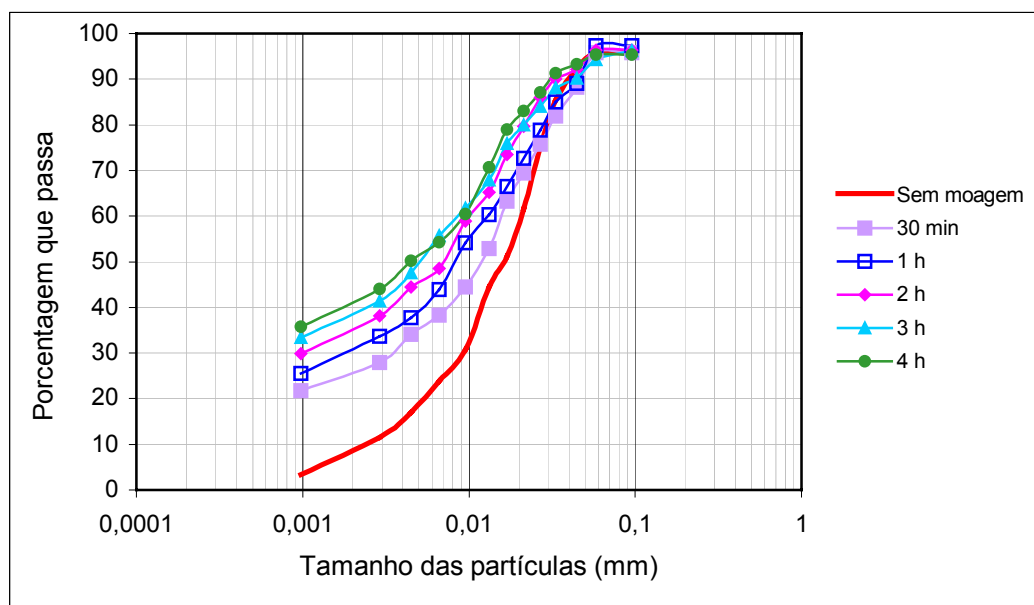


Figura 5.8 – Curvas granulométricas da CBCA (COAGRO) calcinadas a 600°C/5h antes e após moagem.

5.6 – Massa Específica

As Tabelas 5.3 e 5.4 expressam os valores das massas específicas teóricas, determinados de acordo com as prescrições da NBR 6474 (1984).

Tabela 5.3 – Massa Específica (sem moagem).

| Temperatura de calcinação | Tempo de calcinação | COAGRO (g/cm ³) | Paraíso (g/cm ³) |
|---------------------------|---------------------|-----------------------------|------------------------------|
| 500°C | 4h | 2,21 | 2,51 |
| | 5h | 2,20 | 2,52 |
| | 6h | 2,20 | 2,50 |
| 600°C | 4h | 2,23 | 2,49 |
| | 5h | 2,25 | 2,48 |
| | 6h | 2,24 | 2,47 |
| 700°C | 4h | 2,24 | 2,50 |
| | 5h | 2,23 | 2,52 |
| | 6h | 2,22 | 2,50 |
| Sem calcinação | | 2,21 | 2,36 |

A CBCA da usina COAGRO calcinada a 600°C por 5 h, após o processo de moagem, apresentou um pequeno acréscimo em sua massa específica devido à redução do volume de material após a moagem, uma vez que a massa foi constante. O acréscimo na massa específica pode ser atribuído ao maior empacotamento acarretado pela transformação do quartzo α em quartzo β . Estes valores de massa específica foram semelhantes aos encontrados por DIAS & PESSANHA (2004), 2,58 g/cm³, para uma moagem de 30 min sem calcinação.

Tabela 5.4 – Massa Específica (com moagem).

| Temperatura e tempo de calcinação | Tempo de moagem | COAGRO (g/cm ³) |
|-----------------------------------|-----------------|-----------------------------|
| 600°C/5h | 30 min | 2,50 |
| | 1 h | 2,57 |
| | 2 h | 2,58 |
| | 3 h | 2,59 |
| | 4 h | 2,57 |

5.7 – Área Específica

A *Tabela 5.5* apresenta as áreas específicas das cinzas da COAGRO antes e após moagem. A moagem por um período de até 3 h proporcionou o aumento da área específica da cinza, variando de 852,31 m²/kg a 1760,45 m²/kg para as cinzas sem moagem e moída por 3 h, respectivamente. Com 4 h de moagem foi possível observar uma redução da área específica, em virtude da aglomeração das partículas.

Tabela 5.5 – Área Específica

| Amostra | Área Específica Blaine (m ² /kg) |
|--------------------------------|---|
| COAGRO 600°C/5h – sem moagem | 852,31 |
| COAGRO 600°C/5h – moída 30 min | 1261,28 |
| COAGRO 600°C/5h – moída 1 h | 1535,22 |
| COAGRO 600°C/5h – moída 2 h | 1618,21 |
| COAGRO 600°C/5h – moída 3 h | 1760,45 |
| COAGRO 600°C/5h – moída 4 h | 1722,36 |

5.8 – Microscopia Eletrônica de Varredura

A CBCA proveniente da usina Paraíso apresentou uma grande quantidade de partículas com dimensões elevadas, como pode ser evidenciada na *Figura 5.9*.

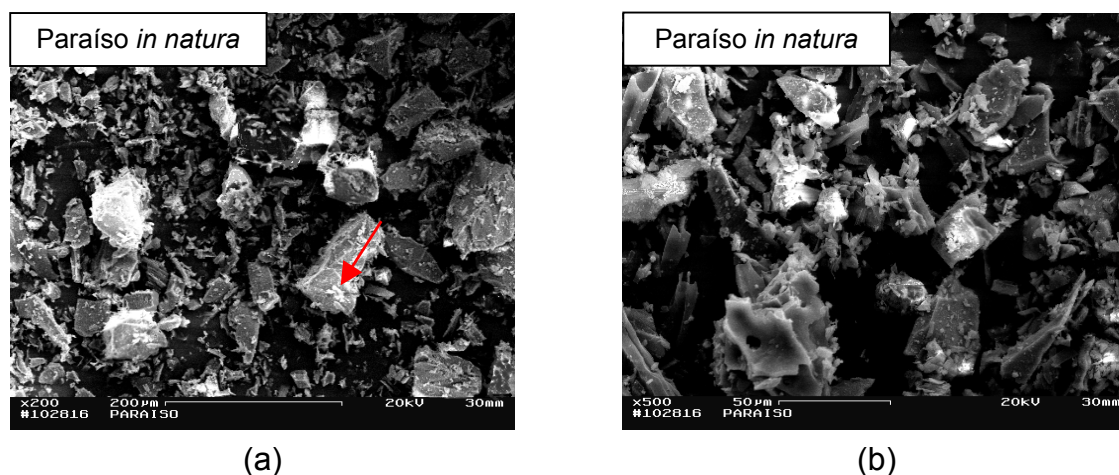


Figura 5.9 – Morfologia das partículas de CBCA da usina Paraíso *in natura* (a) com aumento de 200 vezes; (b) com aumento de 500 vezes.

A morfologia destas partículas é semelhante à encontrada por CORDEIRO (2004), *Figura 5.10*, na qual foram identificadas (seta) partículas quartzo.

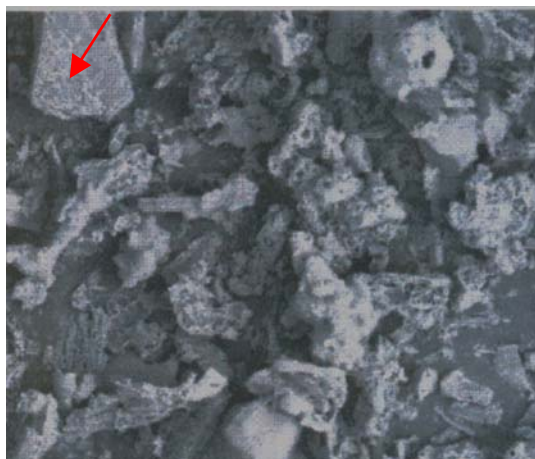


Figura 5.10 – Morfologia das partículas de CBCA da usina Barcelos
(CORDEIRO, 2004).

A CBCA da usina COAGRO apresentou uma menor quantidade de quartzo em relação à CBCA da usina Paraíso (*Figura 5.11a* e *Figura 5.11b*). Após a calcinação e moagem da cinza, foi possível observar que houve a redução do tamanho de grande parte dos grãos (*Figura 5.11c* e *Figura 5.11d*) e uma maior homogeneização dos mesmos. Também ocorreu a quebra das partículas aciculares ricas em carbono com a moagem.

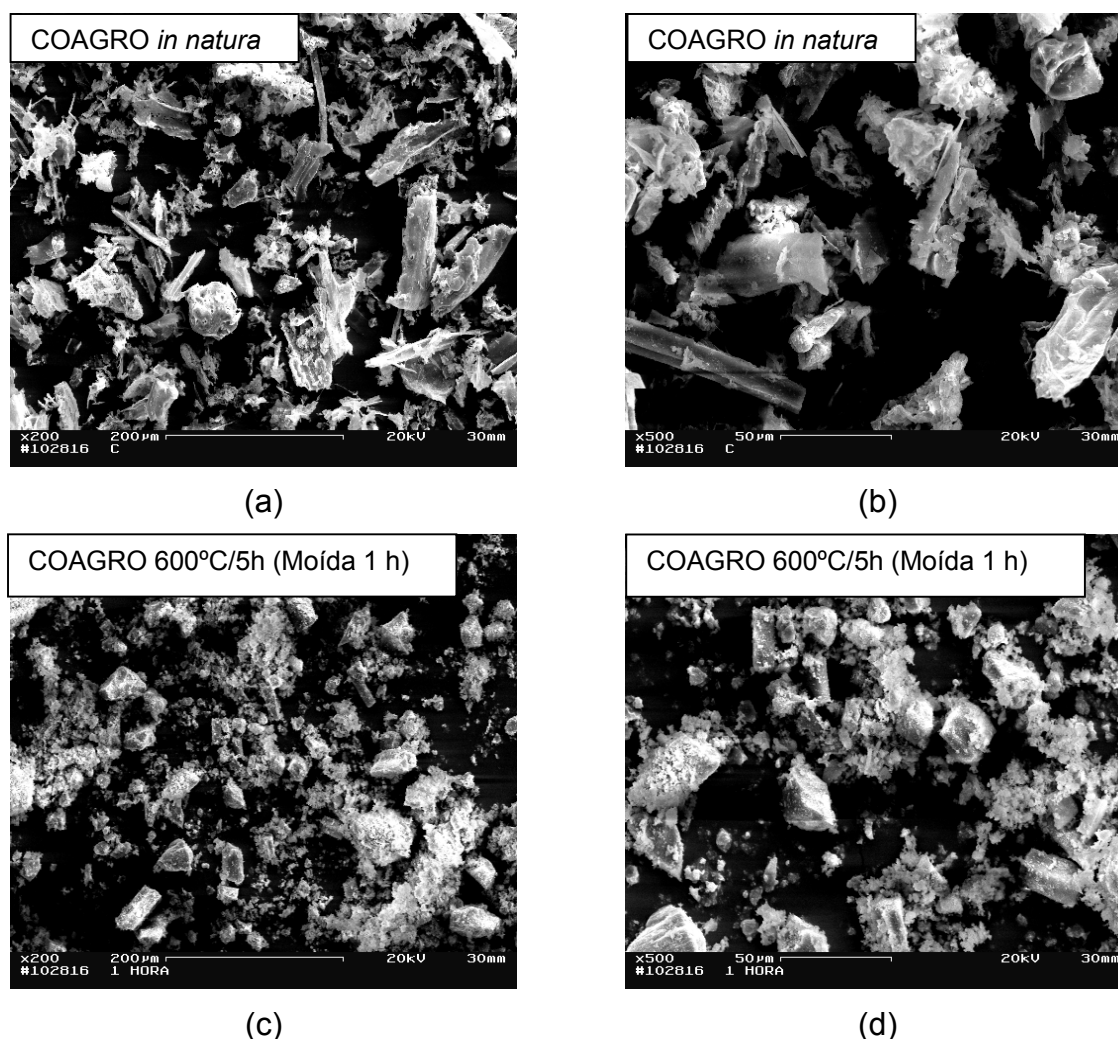


Figura 5.11 – Morfologia das partículas de CBCA da COAGRO [(a) e (b)] *in natura* e [(c) e (d)] após calcinação (600°C/5h) e moagem por 1 h.

[Imagens obtidas por MEV – aumento de 200 vezes para as imagens (a) e (c) e de 500 vezes para as imagens (b) e (d)].

5.9 – Método de Determinação de Atividade Pozolânica em Cimento Portland Pozolânico (NBR 5753, 1998)

A Tabela 5.6 apresenta a alcalinidade e o teor de CaO da solução para as amostras com substituição em porcentagens de 15 e 50% do cimento por CBCA, ou seja, amostras contendo 15% de CBCA e 85% de cimento Portland CPIIE-32, em massa, e amostras contendo 50% de CBCA e 50% de cimento, em massa. Também foi ensaiada a amostra de referência, contendo apenas cimento, a qual ficou situada acima da isoterma de solubilidade (Figura 5.12).

Tabela 5.6 – Resultados do método proposto pela NBR 5753 (1998).

| Material | | | Alcalinidade total da solução (milimoles OH ⁻ / L) | | Teor de CaO da solução (milimoles CaO / L) | |
|------------------------------|-------|-----|--|------------------------|---|------------------------|
| | | | 15% de substituição | 50% de substituição | 15% de substituição | 50% de substituição |
| CBCA COAGRO | 500°C | 4h | 50,4 | 19,0 | 4,8 | 3,5 |
| | | 5 h | 37,8 | 19,0 | 4,3 | 3,3 |
| | | 6 h | 40,4 | 22,0 | 5,0 | 3,4 |
| | 600°C | 4 h | 35,6 | 19,4 | 3,0 | 1,7 |
| | | 5 h | 36,4 | 21,2 | 3,4 | 1,7 |
| | | 6 h | 37,2 | 24,0 | 3,4 | 1,5 |
| | 700°C | 4 h | 38,0 | 20,8 | 3,0 | 1,7 |
| | | 5 h | 39,0 | 22,0 | 2,3 | 1,7 |
| | | 6 h | 41,0 | 25,8 | 3,2 | 3,3 |
| CBCA Paraíso | 500°C | 4 h | 50,4 | 43,0 | 10,2 | 8,3 |
| | | 5 h | 48,0 | 37,6 | 12,1 | 7,6 |
| | | 6 h | 47,6 | 38,8 | 12,3 | 9,7 |
| | 600°C | 4 h | 52,8 | 36,8 | 11,6 | 6,9 |
| | | 5 h | 47,6 | 36,2 | 10,3 | 6,3 |
| | | 6 h | 53,2 | 35,2 | 11,5 | 5,5 |
| | 700°C | 4 h | 47,8 | 37,6 | 10,8 | 9,1 |
| | | 5 h | 47,0 | 44,8 | 10,0 | 9,8 |
| | | 6 h | 46,4 | 37,2 | 10,5 | 7,5 |
| Cimento Portland CPIIE-32 | | | 62,2 | | 13,1 | |

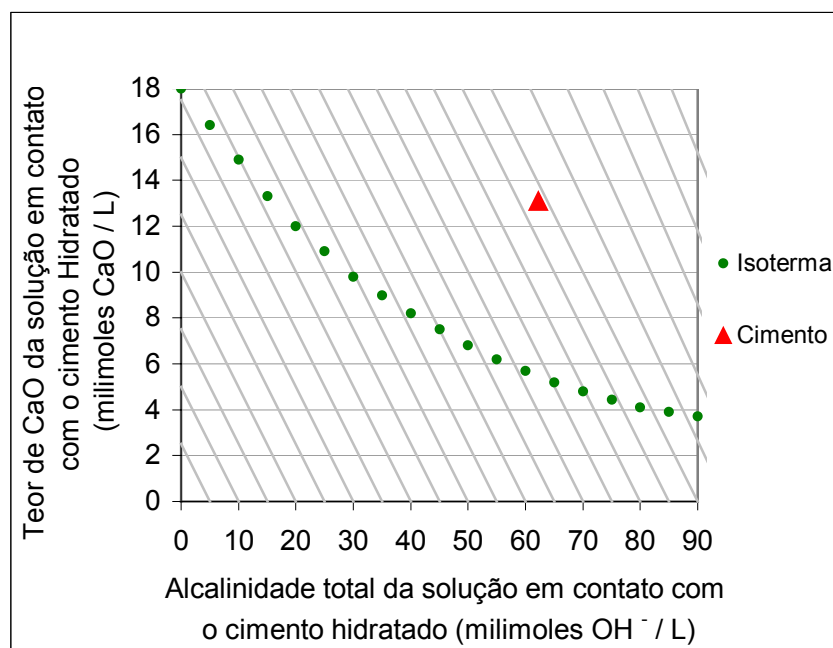


Figura 5.12 – Resultado do ensaio proposto pela NBR 5753 (1998) – Cimento Portland.

De acordo com a NBR 5753 (1998), “Método de Determinação de atividade pozolânica em cimento Portland pozolânico”, são classificados como materiais pozolânicos os que estiverem situados abaixo da isoterma de solubilidade.

Como é possível verificar nas Figuras 5.13 a 5.15, CBCA da COAGRO, todas as amostras situaram-se abaixo desta curva, estando, porém, algumas bem próximas a ela, o que indica menor pozolanicidade.

A temperatura de 600°C foi a que apresentou os melhores resultados de pozolanicidade, uma vez que os pontos representativos de cada amostra encontram-se mais afastados e abaixo da isoterma de solubilidade.

Sendo a atividade pozolânica uma reação com hidróxido de cálcio, o progresso da hidratação implica a redução do teor desta fase da mistura (FREIRE & BERALDO, 2003). Logo, o menor teor de CaO na solução em contato com o cimento hidratado, representado pelos pontos situados mais afastados da isoterma, revela seu maior consumo e, conseqüentemente, maior reação e maior pozolanicidade.

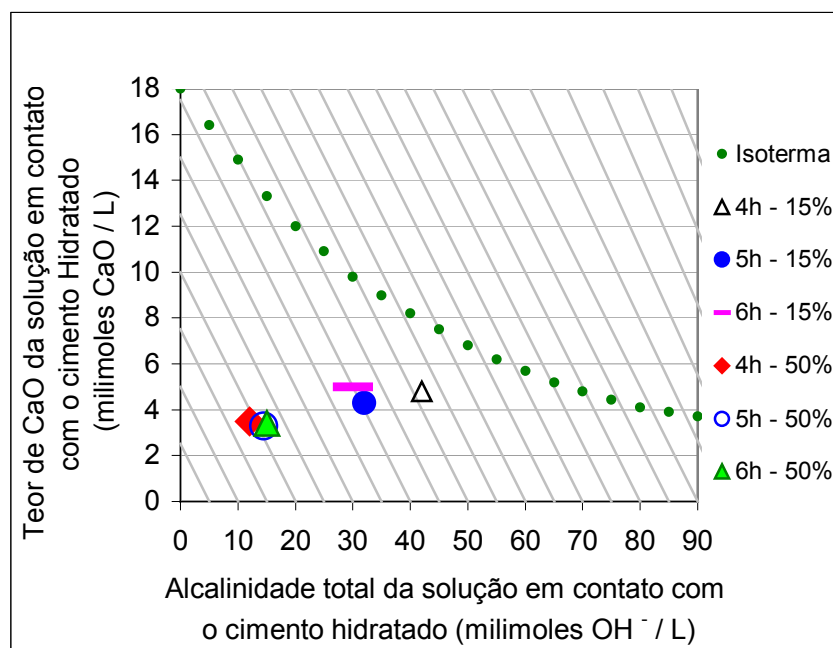


Figura 5.13 – Resultados do ensaio proposto pela NBR 5753 (1998) – CBCA calcinada a 500°C (COAGRO).

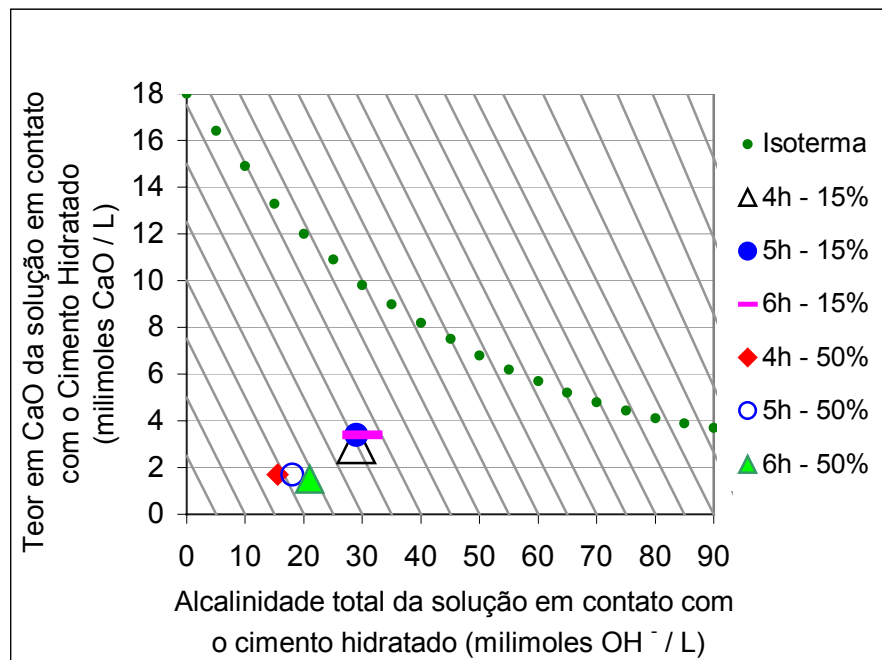


Figura 5.14 – Resultados do ensaio proposto pela NBR 5753 (1998) – CBCA calcinada a 600°C (COAGRO).

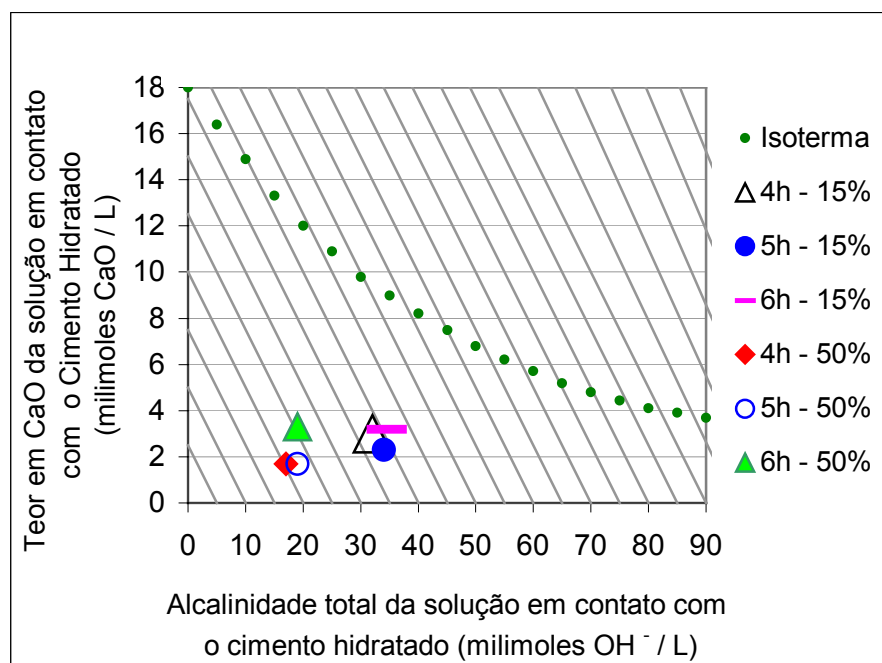


Figura 5.15 – Resultados do ensaio proposto pela NBR 5753 (1998) – CBCA calcinada a 700°C (COAGRO).

As Figuras 5.16 a 5.18 apresentam os resultados obtidos para as CBCA provenientes da usina Paraíso, segundo a NBR 5753 (1998).

As amostras calcinadas à temperatura de 500°C (Figura 5.16) situaram-se acima e/ou próximas à isoterma de solubilidade, caracterizando baixa ou nenhuma pozolanicidade.

Assim como a CBCA procedente da usina COAGRO, a CBCA da usina Paraíso também apresentou os melhores resultados de pozolanicidade para as amostras calcinadas à temperatura de 600°C (Figura 5.17), porém a CBCA da usina COAGRO foi mais pozolânica.

A Figura 5.18 mostra os resultados obtidos para as amostras calcinadas à temperatura de 700°C, cujos valores foram próximos aos obtidos para as CBCA calcinadas à 500°C.

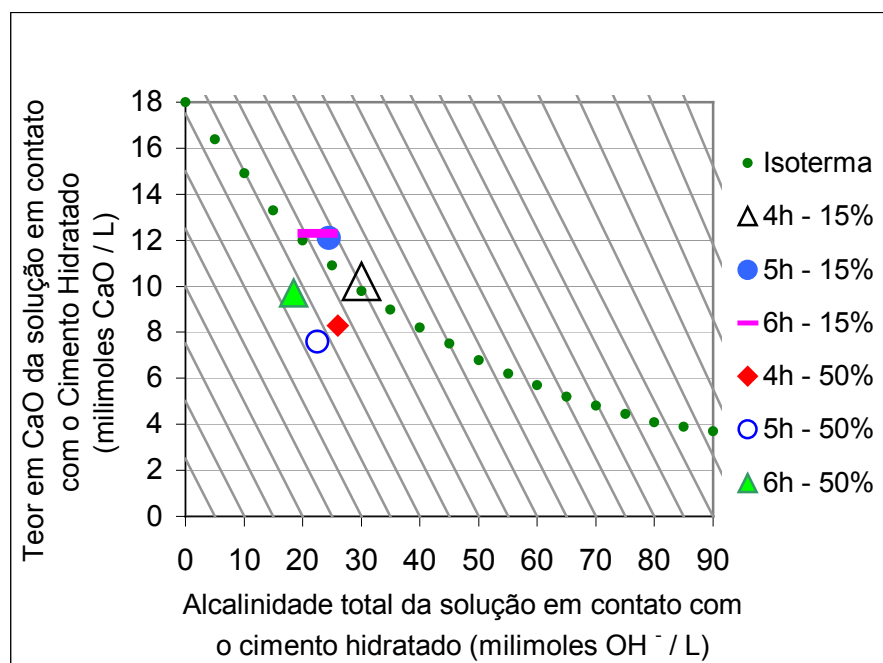


Figura 5.16 – Resultados do ensaio proposto pela NBR 5753 (1998) – CBCA calcinada a 500°C (Paraíso).

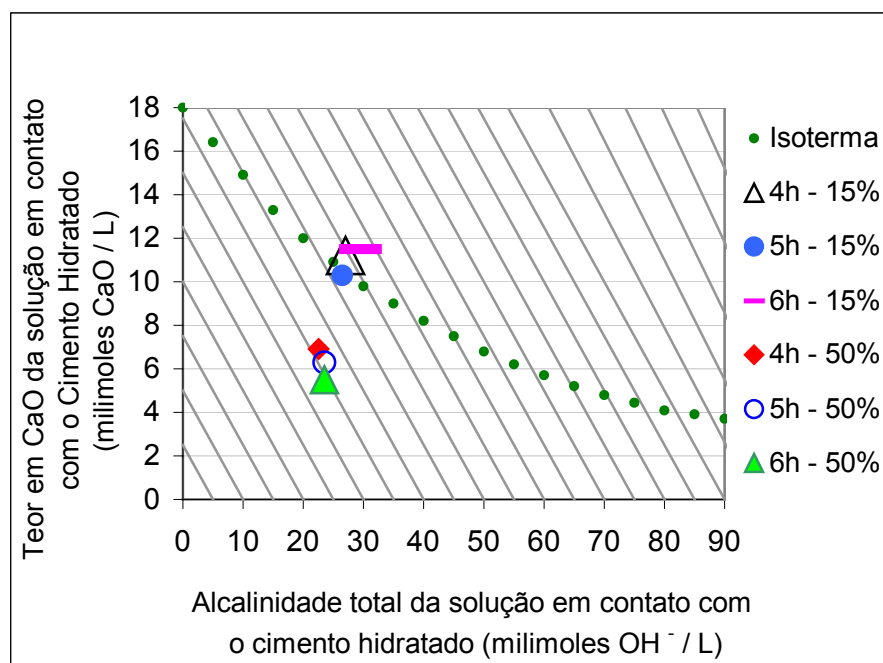


Figura 5.17 – Resultados do ensaio proposto pela NBR 5753 (1998) – CBCA calcinada a 600°C (Paraíso).

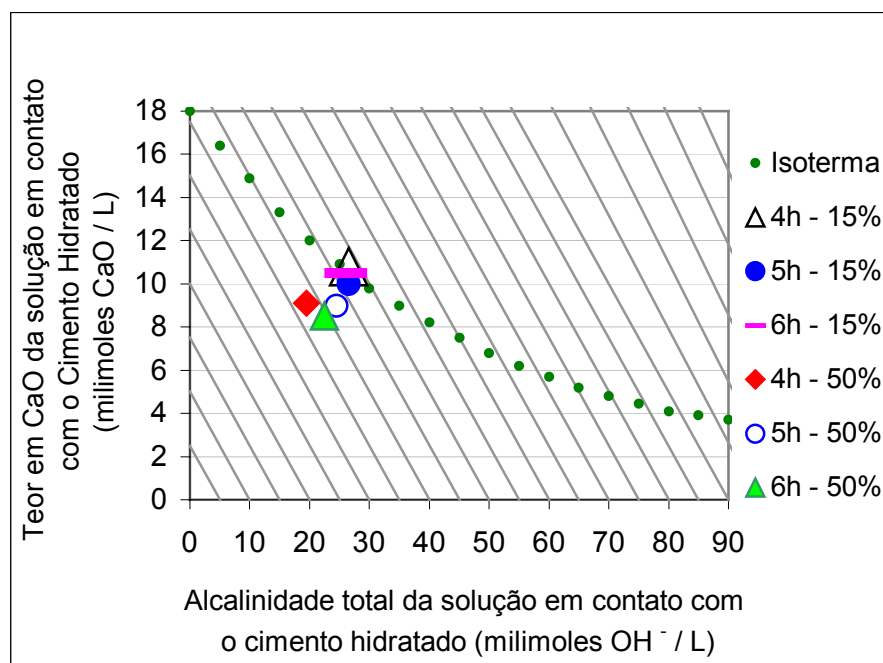


Figura 5.18 – Resultados do ensaio proposto pela NBR 5753 (1998) – CBCA calcinada a 700°C (Paraíso).

Os resultados encontrados neste ensaio confirmaram as análises obtidas por meio da difração de raios X, onde a CBCA oriunda da usina Paraíso apresentou maior cristalinidade que a CBCA proveniente da usina COAGRO e, conseqüentemente, menor pozolanicidade, uma vez que a presença de fases cristalinas diminui a reatividade do material.

5.10 – Índice de Atividade Pozolânica (NBR 5752, 1992)

O índice de atividade pozolânica (IAP) foi determinado para as CBCA da usina COAGRO *in natura*, calcinada à temperatura de 600°C por 5 h e também para amostra calcinada e moída nos tempos de 30 min, 1 h, 2 h, 3 h e 4 h. A dosagem dos materiais empregados na confecção das argamassas está relacionada na Tabela 5.7. Foram utilizados 35% de cinza em substituição ao cimento Portland, conforme estabelecido na NBR 5752 (1992).

Tabela 5.7 – Dosagem de material para ensaio de índice de atividade pozolânica (NBR 5752, 1992).

| Tratamento da CBCA | | Água/Agl. | CBCA (g) | Cimento (g) | Areia (g) | Água (g) | Consistência (mm) |
|--------------------|---------------|-----------|-------------|----------------|--------------|-------------|----------------------|
| <i>in natura</i> | | 0,77 | 82,6 | 202,8 | 936,0 | 219,9 | 220,0 |
| 600°C/5h | Sem moagem | 0,60 | 84,1 | 202,8 | 936,0 | 182,1 | 220,0 |
| | 30 min moagem | 0,58 | 93,5 | 202,8 | 936,0 | 172,0 | 222,0 |
| | 1 h moagem | 0,62 | 96,1 | 202,8 | 936,0 | 184,2 | 225,0 |
| | 2 h moagem | 0,57 | 96,5 | 202,8 | 936,0 | 172,0 | 220,0 |
| | 3 h moagem | 0,59 | 96,9 | 202,8 | 936,0 | 178,1 | 223,0 |
| | 4 h moagem | 0,60 | 96,1 | 202,8 | 936,0 | 178,1 | 220,0 |
| Argamassa padrão | | 0,56 | 0 | 312,0 | 936,0 | 174,7 | 225,0 |

O IAP das amostras acima relacionadas está apresentado na *Figura 5.19*. As CBCA *in natura* e calcinada à 600°C/5h apresentaram IAP inferior ao mínimo estabelecido pela NBR 12653 (1992), cujo valor mínimo é de 75%. Após o processo de moagem, todas as amostras superaram este valor mínimo. Isto se deve ao fato de que a moagem possibilitou a redução do tamanho dos grãos, o aumento da superfície específica e uma maior homogeneização dos mesmos, permitindo, assim, um ganho de resistência mecânica das argamassas.

O tempo de moagem de 3 h apresentou o melhor IAP (107%), superando a resistência obtida pela argamassa de referência. Porém a moagem por 1h foi escolhida para realização dos ensaios Chapelle e mecânico (NBR 5752, 1992) por apresentar resistência próxima à da argamassa de referência (sem substituição por CBCA), além de exigir um gasto energético menor que os tempos maiores de moagem (2 h, 3 h e 4 h).

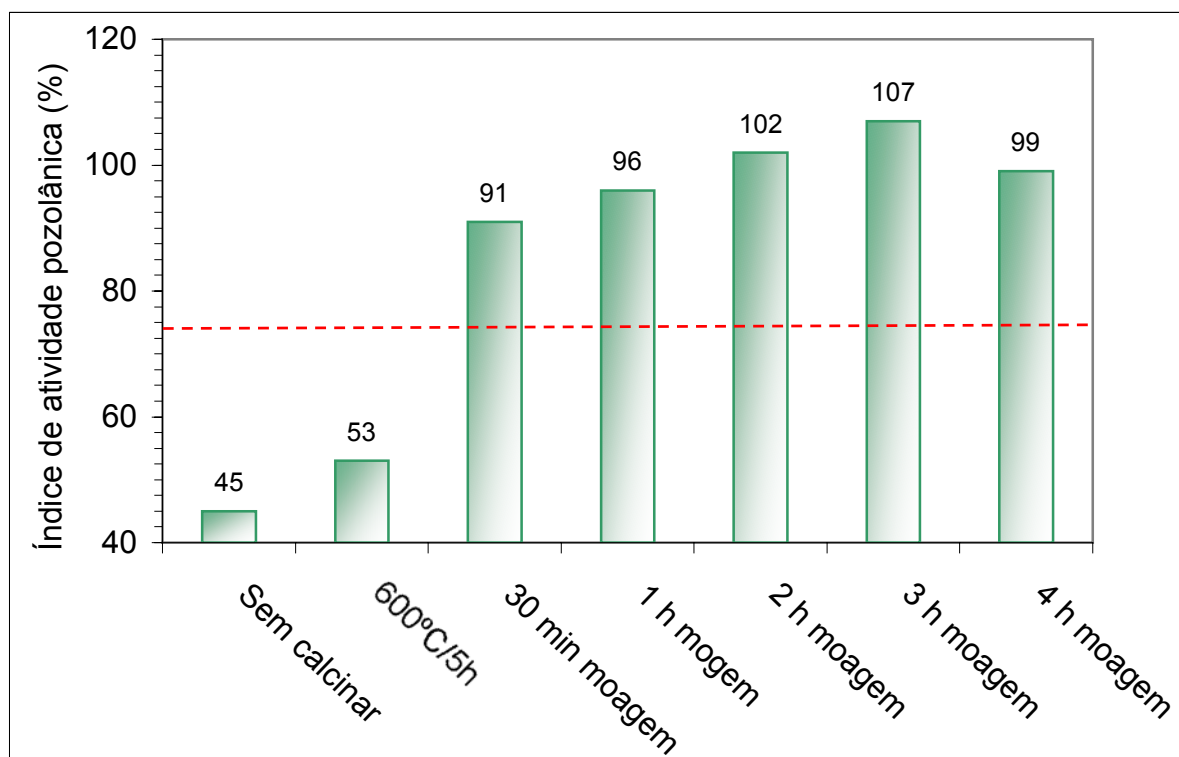


Figura 5.19 – Índice de atividade pozolânica das CBCA (COAGRO) com cimento Portland. A linha tracejada indica o valor mínimo estabelecido pela NBR 12653 (1992).

5.11 – Ensaio Chapelle

Segundo RAVRDY *et al.* (1980), para um material ser considerado pozolânico, o consumo de CaO deve ser superior a 330 mg CaO/g de pozolana. A Tabela 5.8 indica os resultados do ensaio Chapelle para as CBCA das usinas Paraíso e COAGRO calcinadas à 600°C por 5 h, e também a cinza da COAGRO calcinada a 600°C/5h e moída por 1 h.

A CBCA proveniente da usina Paraíso apresentou um consumo de óxido de cálcio abaixo do mínimo necessário para classificação como material pozolânico. A elevada presença de quartzo, evidenciada nas análises por difração de raios X, influenciou diretamente no comportamento da CBCA devido à natureza inerte desta fase.

Tabela 5.8– Resultado do ensaio Chapelle.

| Identificação da amostra | | | Resultados de atividade pozolânica a $(90 \pm 5) ^\circ\text{C}$ (mg CaO/g amostra) |
|--------------------------|----------|------------|---|
| COAGRO | 600°C/5h | sem moagem | 406 |
| Paraíso | | sem moagem | 162 |
| COAGRO | | 1h moagem | 457 |

Já as cinzas oriundas da usina COAGRO apresentaram um consumo de até 457mg CaO/g de CBCA, indicando boa capacidade de reação com a cal, possibilitando a formação de compostos com propriedades cimentícias.

O processo de moagem realizado para a CBCA calcinada a 600°C por 5 h, da usina COAGRO, ocasionou um aumento da atividade pozolânica, uma vez que a diminuição das partículas promove maior área de contato para reação.

5.12 – Resistência Mecânica

A resistência mecânica foi analisada a partir da produção de dois lotes de argamassas: o primeiro contendo substituições de 0, 5, 10, 15 e 20% de CBCA (COAGRO) calcinada a 600°C/5h; o segundo, com as mesmas substituições e mesma CBCA, porém moída por um período de 1h. Este tempo de moagem foi adotado por apresentar IAP superior ao mínimo estabelecido pela NBR 5752 (1992) e também por apresentar resistência próxima à da argamassa de referência, mas com tempo de moagem inferior, o que significa menor custo com este processo.

A dosagem dos materiais empregados na fabricação das argamassas está relacionada na *Tabela 5.9*.

É possível constatar a diminuição da demanda de água das argamassas com CBCA moída em relação às argamassas com CBCA sem moagem. Este fato pode ser atribuído à quebra da estrutura esponjosa da CBCA.

Tabela 5.9 – Dosagem de material para ensaio de resistência à compressão simples de argamassas.

| Material | Teor de adição | Água/Agl. | CBCA (g) | Cimento (g) | Areia (g) | Água (g) | Abatimento (mm) |
|---|----------------|-----------|----------|-------------|-----------|----------|-----------------|
| CBCA (COAGRO) calcinada 600°C/5h | 5% | 0,59 | 19,4 | 369,4 | 1166,6 | 231,0 | 250,0 |
| | 10% | 0,63 | 38,9 | 350,0 | 1166,6 | 246,4 | 248,3 |
| | 15% | 0,63 | 58,3 | 330,6 | 1166,6 | 246,4 | 246,0 |
| | 20% | 0,65 | 77,8 | 311,1 | 1166,6 | 254,1 | 246,7 |
| CBCA (COAGRO) calcinada 600°C/5h, moída 1 h | 5% | 0,58 | 19,4 | 369,4 | 1166,6 | 225,6 | 255,0 |
| | 10% | 0,58 | 38,9 | 350,0 | 1166,6 | 225,6 | 252,0 |
| | 15% | 0,60 | 58,3 | 330,6 | 1166,6 | 233,3 | 253,0 |
| | 20% | 0,60 | 77,8 | 311,1 | 1166,6 | 233,3 | 248,0 |
| Argamassa de referência | | 0,58 | 0 | 388,9 | 1166,6 | 225,6 | 260,0 |

A Figura 5.20 apresenta a evolução da resistência à compressão simples das argamassas com substituição de CBCA sem moagem. Houve uma redução significativa da resistência à medida que se aumentou o teor de substituição por CBCA, mesmo com o aumento da idade.

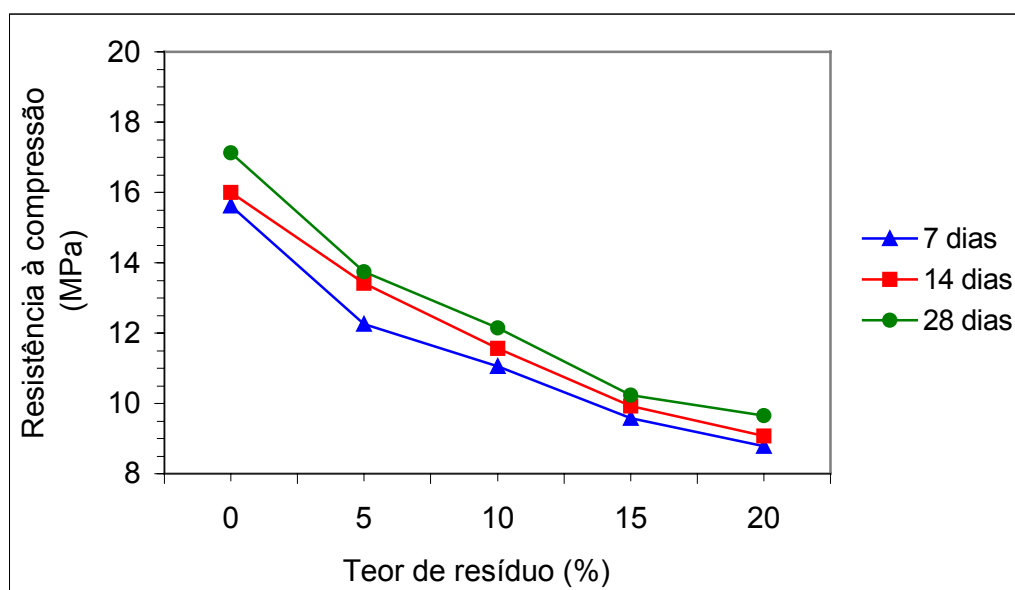


Figura 5.20 – Evolução da resistência à compressão das argamassas (CBCA da usina COAGRO sem moagem).

Aos 28 dias (*Figura 5.20*) a redução da resistência ainda foi acentuada. Este comportamento mostra que apenas o processo de calcinação não é suficiente para tornar o material mais reativo.

Após o processo de moagem da CBCA por um período de 1 hora, foi possível observar uma melhora significativa na resistência à compressão das argamassas produzidas com substituições (5, 10, 15 e 20%) de cimento por CBCA (*Figura 5.21*).

Aos 14 dias a resistência à compressão das argamassas com substituição por CBCA ainda permanece abaixo da resistência obtida pela argamassa de referência (sem substituição por CBCA), mas esta redução foi pequena.

Somente aos 28 dias foi possível observar que o aumento da substituição por CBCA até teores de 10% acarretou um aumento da resistência à compressão. Este comportamento é atribuído à velocidade da reação pozolânica, que é lenta. Como o aumento da resistência é mais acentuado em idades mais avançadas, é possível a incorporação de um teor de CBCA um pouco mais elevado e com acréscimo de resistência mecânica.

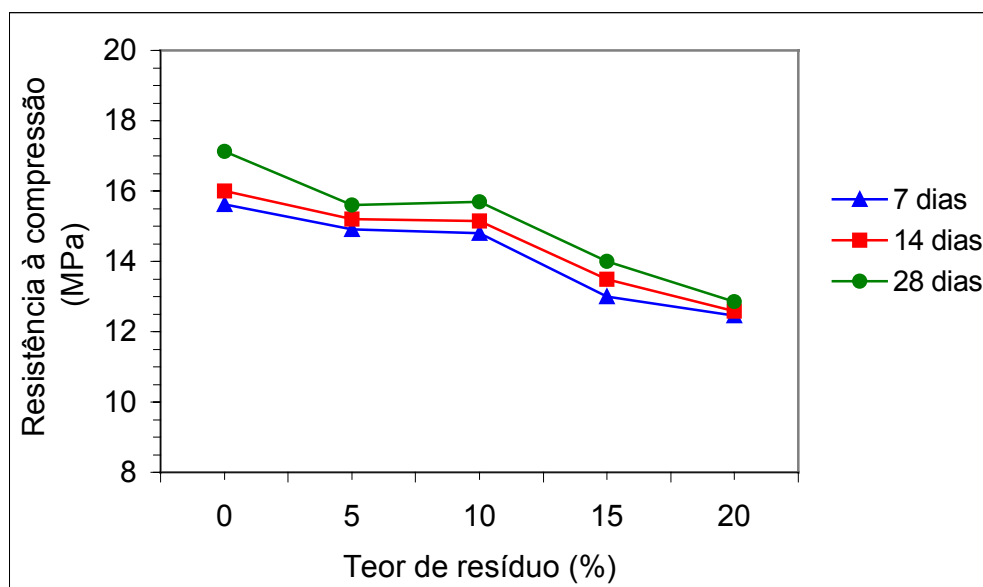


Figura 5.21 – Evolução da resistência à compressão das argamassas (CBCA moída).

A *Figura 5.22* apresenta a influência do teor de CBCA moída na resistência à compressão das argamassas, mediante a determinação da variação da resistência mecânica.

A redução da resistência nas primeiras idades foi pequena, aproximadamente 5%, para teores de até 10% de substituição de CBCA. A redução mais acentuada ocorreu para teores mais elevados de cinza, que chegou a aproximadamente 20% em relação à argamassa de referência.

Aos 28 dias, os valores de resistência das argamassas com substituição por CBCA, apesar de inferiores, foram bem próximos ao da argamassa de referência quando a substituição foi por teores de 10% de CBCA. As argamassas com substituição de 5 e 10% apresentaram, respectivamente, porcentagens de queda iguais a 8,88 e 8,29%.

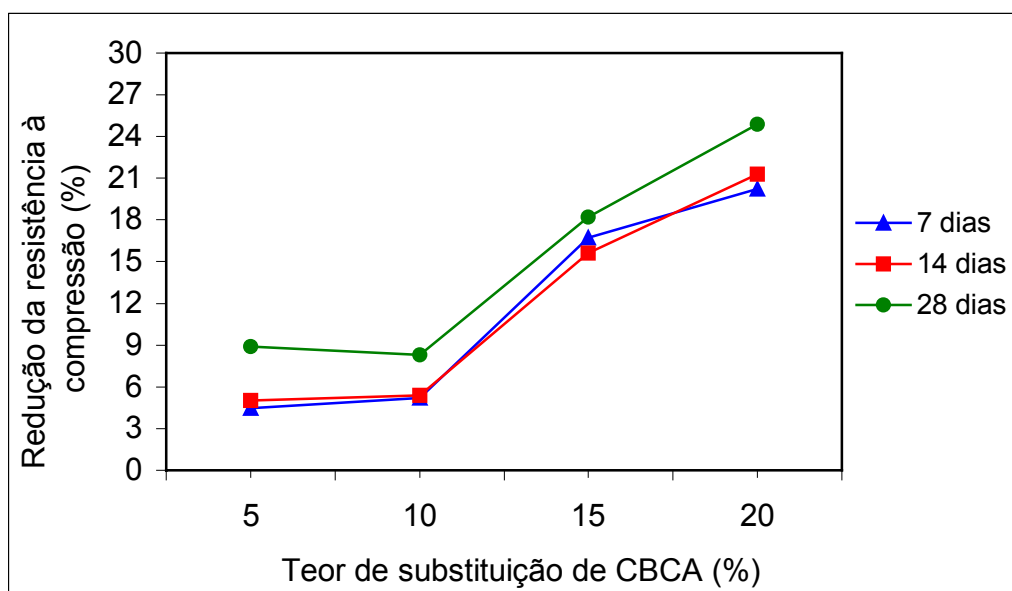


Figura 5.22 – Influência do teor de CBCA moída na resistência à compressão das argamassas.

As Tabelas 5.10 e 5.11 apresentam os valores de desvio padrão e coeficiente de variação das argamassas com CBCA sem moagem e moída, respectivamente. O coeficiente de variação para os dois tipos de argamassa foi pequeno, situado abaixo de 10% para todos os teores de substituição.

Tabela 5.10 – Desvio padrão e coeficiente de variação da resistência mecânica das argamassas (CBCA sem moagem).

| | Idade (dias) | Teor de resíduo (%) | Resistência à Compressão (MPa) | CV |
|------------|--------------|---------------------|--------------------------------|------|
| | | | | (%) |
| Sem moagem | 7 | 5 | 12,26 ± 0,52 | 4,26 |
| | | 10 | 11,05 ± 1,00 | 9,08 |
| | | 15 | 9,58 ± 0,90 | 9,40 |
| | | 20 | 8,79 ± 0,30 | 3,42 |
| | 14 | 5 | 13,42 ± 0,52 | 3,89 |
| | | 10 | 11,57 ± 0,63 | 5,43 |
| | | 15 | 9,92 ± 0,49 | 4,94 |
| | | 20 | 9,08 ± 0,72 | 7,95 |
| | 28 | 5 | 13,75 ± 0,42 | 3,06 |
| | | 10 | 12,15 ± 0,35 | 2,89 |
| | | 15 | 10,24 ± 0,21 | 2,01 |
| | | 20 | 9,65 ± 0,40 | 4,19 |

Tabela 5.11 – Desvio padrão e coeficiente de variação da resistência mecânica das argamassas (CBCA com moagem).

| | Idade (dias) | Teor de resíduo (%) | Resistência à Compressão (MPa) | CV (%) |
|------------|--------------|---------------------|--------------------------------|--------|
| | | | | |
| Com moagem | 7 | 5 | 14,91 ± 0,33 | 2,21 |
| | | 10 | 14,80 ± 0,71 | 4,78 |
| | | 15 | 12,75 ± 0,48 | 3,79 |
| | | 20 | 12,45 ± 0,86 | 6,87 |
| | 14 | 5 | 15,02 ± 0,21 | 1,38 |
| | | 10 | 15,14 ± 0,65 | 4,32 |
| | | 15 | 12,78 ± 0,79 | 6,17 |
| | | 20 | 12,59 ± 0,34 | 2,72 |
| | 28 | 5 | 15,42 ± 0,67 | 4,36 |
| | | 10 | 15,89 ± 0,70 | 4,42 |
| | | 15 | 13,02 ± 0,21 | 1,60 |
| | | 20 | 12,86 ± 0,66 | 5,10 |

6 – CONSIDERAÇÕES FINAIS

6.1 – Conclusões

De acordo com os resultados obtidos no programa experimental, foi possível confirmar a potencialidade do uso da cinza do bagaço da cana-de-açúcar (CBCA) em substituição parcial ao cimento Portland na produção de argamassas.

Fato importante foi a diferença de comportamento mostrada pelas duas cinzas (COAGRO e Paraíso) da mesma região, Norte Fluminense. A CBCA proveniente da usina Paraíso não apresentou bons resultados no emprego em substituição parcial ao cimento Portland. Este fato se deve à presença da fase cristalina (quartzo), que torna o material menos reativo e, conseqüentemente, com baixa atividade pozolânica.

Para o emprego desta CBCA faz-se necessário um maior controle na usina, a fim de que o bagaço empregado nas fornalhas das caldeiras possa estar livre de contaminantes, como areia. Além disto, é preciso um controle sobre a área de estocagem desta cinza, para que outros materiais provenientes da limpeza da usina não sejam incorporados a ela.

A CBCA proveniente da usina COAGRO apresentou uma quantidade menor de quartzo, e a calcinação adicional realizada no laboratório, possibilitou a eliminação do carbono.

Os diversos ensaios realizados permitiram determinar o potencial da cinza da usina COAGRO após o processo de calcinação, como pozolana para argamassa. A temperatura de 600°C revelou os melhores resultados de reatividade do material.

A CBCA (COAGRO) calcinada a 600°C por 5 h, escolhida para estudos de resistência à compressão, apresentou atividade pozolânica inferior ao valor mínimo estabelecido pela NBR 5752 (1992). O emprego desta cinza acarretou a queda acentuada da resistência à compressão para todas as idades ensaiadas, medida nas argamassas com substituição do cimento Portland por CBCA (5, 10, 15 e 20%) em relação à de referência (sem CBCA).

O estudo de moagem, realizado em função desta diminuição na resistência mecânica das argamassas, mostrou uma diferença significativa na granulometria das

CBCA para os diversos tempos de moagem, aumentando a quantidade de grãos com diâmetros menores que 0,01 mm. Esta alteração na granulometria da CBCA (COAGRO) proporcionou uma maior superfície de contato dos grãos de CBCA, aumentando, assim, a reatividade do material e também favoreceu o efeito filer ocasionado pelo quartzito moído.

As argamassas produzidas com CBCA calcinada a 600°C por 5 h e moída por 1 h, com substituições do cimento Portland de até 10%, apresentaram resistências à compressão próximas à da argamassa de referência, com reduções inferiores a 9%. Estas reduções podem ser minimizadas, ou até mesmo eliminadas, com o aumento do tempo de moagem e/ou a utilização de um moinho com maior eficiência.

É preciso deixar claro que este trabalho foi uma investigação preliminar sobre as CBCA da região Norte Fluminense, e que estudos mais aprofundados são necessários à viabilização técnica e econômica deste resíduo para seu confiável emprego como material de construção. A utilização deste resíduo tem importância não só sob o aspecto econômico, mas também ambiental, onde os danos acarretados à natureza com a produção de cimento são minimizados por sua substituição parcial pela CBCA.

6.2 – Sugestões para Trabalhos Futuros

Torna-se necessária a investigação mais detalhada do processo de obtenção das CBCA nas diversas usinas da região Norte Fluminense, a fim de se fazer um comparativo entre as mesmas, destacando-se suas diferenças para uma futura homogeneização deste processo nas diversas unidades sucroalcooleiras. Nesta etapa poderá ser averiguado o estado do bagaço (contaminação) utilizado, o teor de umidade do bagaço, a temperatura atingida na fornalha, o processo de estocagem da cinza depois de sua retirada da fornalha etc.

Em virtude de dificuldades de acesso a algumas usinas ou de contaminação da CBCA após sua retirada das fornalhas, neste trabalho foram caracterizadas apenas as cinzas provenientes de duas usinas. Portanto, também é necessária a caracterização das CBCA provenientes das demais usinas, a fim de se obter uma análise mais representativa deste resíduo na região Norte Fluminense.

Posteriormente, é sugerido um estudo mais abrangente sobre o processo de moagem da CBCA em moinhos industriais, analisando sua eficiência por meio da resistência adicional conferida às argamassas. Esta análise também se estende ao tipo de forno a ser utilizado, uma vez que fornos rotativos conferem maior homogeneidade de queima.

A produção de argamassas com outros teores de CBCA em traços mais empregados na região Norte Fluminense também é importante para a viabilização do uso deste resíduo como material de construção. Também é sugerido um estudo de álcali-ativação da cinza.

E hoje, sem dúvida, é de fundamental importância um estudo de desempenho, uma vez que resistência mecânica e durabilidade são indissociáveis.

7 – REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- AFONSO, W.M. (2005) Caracterização de resíduo de corte de rochas na produção de argamassas. Tese (Mestrado em Engenharia Civil) - Campos dos Goytacazes - RJ, Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro - UENF, 122p.
- ÃITICIN, P. (2000) Concreto de Alto Desempenho. Trad. Serra, G. G. 1ª ed. São Paulo: Editora PINI, 667p.
- AMORIM, L. V., PEREIRA, A. S. G., NEVES, G. A. e FERREIRA, H. C. (1999) Reciclagem de rejeitos da construção civil para uso em argamassas de baixo custo. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, Campina Grande - PB, 3:222-228.
- ÂNGULO, S. C., ZORDAN, S. E., JOHN, V. M. (2001) Desenvolvimento sustentável e a reciclagem de resíduos na construção civil. Disponível na internet: <www.pcc.usp.br>. Acesso em março de 2004.
- ARAÚJO, R. M., GOGOLA, G. W., LIMA, A. J. M., RISTOW NETO, R., WEBER, S. L. (2003) Influência do teor de metacaulim na resistência do cimento Portland. Simpósio EPUSP sobre Estruturas de Concreto, V, São Paulo.
- ARBEX, M.A. (2001) Avaliação dos efeitos do material particulado proveniente da queima da plantação de cana-de-açúcar sobre a morbidade respiratória na população de Araraquara-SP. Tese (Doutorado) - São Paulo - SP, Faculdade de Medicina da Universidade de São Paulo, 188p.
- Associação Brasileira de Normas Técnicas (1989) Análise química de cimento Portland – Determinação de perda ao fogo: NBR 5743. Rio de Janeiro.
- Associação Brasileira de Normas Técnica (1982) Areia Normal para ensaio de cimento: NBR 7214. Rio de Janeiro.

Associação Brasileira de Normas Técnicas (1995) Argamassa para assentamento de paredes e revestimento de paredes e tetos - determinação do teor de água para obtenção do índice de consistência padrão: NBR 13276. Rio de Janeiro.

Associação Brasileira de Normas Técnicas (1998) Cimentos – Método de determinação de atividade pozolânica em cimento Portland pozolânico: NBR 5753. Rio de Janeiro.

Associação Brasileira de Normas Técnicas (1984) Cimento Portland e outros materiais em pó determinação da massa específica: NBR 6474. Rio de Janeiro.

Associação Brasileira de Normas Técnicas (1998) Cimento Portland – determinação da finura pelo método de permeabilidade ao ar (método de Blaine): NBR NM 76. Rio de Janeiro.

Associação Brasileira de Normas Técnicas (1998) Cimento Portland pozolânico: NBR 5736. Rio de Janeiro.

Associação Brasileira de Normas Técnicas (1984) Grãos de solos que passam na peneira de 4,8 mm - determinação da massa específica: NBR 6508. Rio de Janeiro.

Associação Brasileira de Normas Técnicas (1992) Materiais pozolânicos: NBR 12653. Rio de Janeiro.

Associação Brasileira de Normas Técnicas (1992) Método de determinação de atividade pozolânica em pozolanas: NBR 5752. Rio de Janeiro.

Associação Brasileira de Normas Técnicas (1984) Solo - análise granulométrica: NBR 7181 MB 32. Rio de Janeiro.

BLEZARD, R. G. (1998) 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.

CALDAS, A., MELO NETO, A. A., JOHN, V. M. e PIRES SOBRINHO, C. W. A. (2000) Tecnologias alternativas para habitação: O uso de cinzas residuais para

produção de novos materiais e componentes construtivos. Congresso Internacional de Tecnologia e Gestão da Qualidade na Construção Civil, II, Recife - PE.

CASTRO, C. A. M. R. (1995) A problemática da agroindústria açucareira no Estado do Rio de Janeiro. Monografia de Bacharelado - Campos dos Goytacazes - RJ, Faculdade Cândido Mendes, 88p.

CHEVRAND, D. (2005) Protocolo de Quioto leva gás carbônico para as bolsas de mercadorias. Disponível na internet: <www.biodiversidadedaamazonia.com.br>. Acesso em março de 2005.

CORDEIRO, G. C. (2004) Otimização do processo de moagem mecânica da cinza residual do bagaço de cana-de-açúcar visando seu emprego como aditivo mineral. Seminário de exame de qualificação para candidatura ao doutorado - Rio de Janeiro - RJ, Universidade Federal do Rio de Janeiro – UFRJ, 126p.

CORDEIRO, G. C. (2001) Concreto de alto desempenho com metacaulinita. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Campos dos Goytacazes - RJ, Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro - UENF, 123p.

DAFICO, D. A. (2003) Método de produção de cinza de casca de arroz para utilização em concretos de alto desempenho. Disponível em <www.ucg.br/Institutos/nucleos> Acesso em 04 de janeiro de 2004.

DANILIAN, V. D. (2005) Sem a Rússia não há Kyoto. ECO 21 - Revista de Ecologia do Século 21, Rio de Janeiro, 99^a ed.

DELLA, V. P., KUHN, I., HOTZA, D. (2001) Caracterização de cinza de casca de arroz para uso como matéria-prima na fabricação de refratários de sílica. Química Nova, São Paulo, 4:778-782.

DIAS, D. P., PESSANHA, M. C. R. (2004) Cimento ecológico para a construção civil: ativação alcalina da cinza do bagaço de cana. ICTR 2004. Florianópolis, SC.

- DOMINGOS, S. (2003) Alternativas para a construção civil. Boletim Educativo do Núcleo de Comunicação do Centro Tecnológico da Universidade Federal de Santa Catarina, ano 2, n.1.
- ESPER, M. W. Características do cimento Portland com adições de escória granulada de alto-forno.
- ERNST, W.G. (1971) Minerais e rochas. Editora Edgard Blücher Ltda. São Paulo, p.162. *apud* DAFICO, D. A.
- FERREIRA, A. A., SILVEIRA, A. A., DAL MOLIN, D. C. C. (1997) A cinza da casca de arroz : possibilidades de utilização como insumo na produção de materiais de construção. Encontro Nacional sobre Edificações e Comunidades Sustentáveis, I, Canela, RS.
- FIESP/CIESP (2001) Ampliação da oferta de energia através da biomassa (bagaço de cana-de-açúcar). São Paulo: FIESP/CIESP, 90p. *apud* CORDEIRO, 2004.
- FIGUEIREDO, A., DJANIKIAN, J. G., HELENE, P. R. L., SELMO, S. M.S., JOHN, V. M. (2002) Adições e tipos de cimento Portland. In: PCC 2340.
- FOLHA DA CANA (2003) Informativo Asflucan – Associação Fluminense dos Plantadores de Cana. n.01.
- FREIRE, W. J., BERALDO, A. L. (2003) Tecnologias e materiais alternativos de construção. Campinas: Editora da UNICAMP, 333p.
- HEMERLY, F. X. (1999) 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.
- HERNÁNDEZ, J. F. M., MIDDENDORF, B., GEHRKE, M., BUDELMANN, H. (1998) Use of wastes of the sugar industry as pozzolana in lime-pozzolana binders: study of the reaction. Cement and Concrete Research, 28:1525-1536.

- HOFFMANN, R., JAHN, S. L., BAVARESCO, M., SARTORI, T. C. (2002) Aproveitamento da cinza produzida na combustão da casca de arroz: estado da arte.
- INMETRO – Instituto Nacional de Metrologia, Normalização e Qualidade Industrial (1999) Disponível na internet : <<http://www.inmetro.gov.br/consumidor/produtos/açúcar>>. Acesso em fevereiro 2005.
- MACHADO, F. B. P. (2003) Brasil, a doce terra - História do Setor. Disponível na internet:<<http://www.procana.com.br>>. Acesso em: fevereiro 2005.
- MANHÃES, M. S. (1999) Adubação, correção do solo e uso de resíduos da agroindústria. In: Tecnologia Canavieira nas Regiões Norte Fluminense e Sul do Espírito Santo - Boletim Técnico, n.12. Campos dos Goytacazes: UFRJ, p.p. 24-31. *apud* Cordeiro (2004).
- MASSAZA, F. (1998) Pozzolana and Pozzolanic Cements. In: Hewlett, P. C. (ed), Lea's Chemistry of Cement and Concrete, 4 ed. New York: J. Wiley, pp. 471-631.
- MENDONÇA, C. E. R. de *et al.* (1987) Agricultura não canavieira em Campos (RJ): Situação atual e perspectiva. Seminário CEPECAM, Campos dos Goytacazes. Faculdade Cândido Mendes, *apud* Hemerly (1999).
- METHA, P. K., MONTEIRO, P.J.M. (1994) Concreto: estrutura, propriedades e materiais. 1ª ed. São Paulo: Editora PINI, 616p.
- MOTHÉ, L. P. (2004) Determinação do processo ideal de produção da metacaulinita por meio da análise de sua atividade pozolânica. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Campos dos Goytacazes - RJ, Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro - UENF, 74p.
- NEVILLE, A. M. (1997) Propriedades do concreto. Trad. Giannusso, S. E. 2ª ed., São Paulo: Editora PINI, 828p.

- NOVA ENCICLOPÉDIA BARSA (2000) Cana-de-açúcar. São Paulo: Macropédia Britânica do Brasil, v. 3, p.p. 381-2.
- O ESTADO DE S. PAULO. Bagaço de cana pode gerar 11% da energia necessária para fugir do apagão. Disponível na internet:<<http://www.estado.estadao.com.br>>. Acesso em: junho 2004.
- PATUSCO, J. A. M. (1997). Biomassa para combustão. Disponível na internet: <<http://ecen.com/content/ee5/biomas.htm>> Acesso em junho de 2004.
- PINTO, C. S. (2000) Curso básico de mecânica dos solos. São Paulo: Editora PINI, 247p.
- PUKASIEWICZ, A. G. M. (2001) Tecnologia dos processos de fabricação IV. Centro Federal de Educação Tecnológica do Paraná. Ponta Grossa, PR.
- RAVERDY, M., BRIVOT, F., PAILLÈRE, A. M., DRON, R. (1980) “Appréciation de l’activité pouzzolanique des constituants secondaires” – 7º Congrès International de la Chimie des Ciments. Paris.
- REVISTA ÁlcolIBRÁS. Edição 82 de Novembro/Dezembro de 2003. Disponível na internet:<<http://www.revistaalcolbras.com.br>>. Acesso junho 2004.
- RIPOLI, T. C. , TILLMANN, C. A. da C. , MILAN, M. (1995) O corte manual da cana verde. São Paulo, SP, p.p. 28-30.
- RODRIGUES, R. (2001) Diário de bordo: bagaço e álcool. Revista Agroanalysis. Disponível na internet:<<http://www.abag.com.br>>. Acesso fevereiro 2005.
- SANTOS, S., PRUDÊNCIO JR., L. R. (1998) Estudo comparativo da pozolanicidade de cinza volante e cinza de casca de arroz residual. Encontro Nacional de Tecnologia do Ambiente Construído – ENTAC 98, VII, Florianópolis, SC.
- SANTOS, S. (1997) Estudo da viabilidade de utilização de cinza de casca de arroz residual em argamassas e concreto. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) Florianópolis - SC, Universidade Federal de Santa Catarina - UFSC, 104p.

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

UDOP - Usinas e destilarias do Oeste paulista (2005) Disponível na internet:<<http://udop.com.br>>. Acesso em fevereiro 2005.

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

YAMAMOTO, J. K., KIHARA, Y., COIMBRA, A. M., MONTANHEIRO, T. J. (1997) Environmental impact reduction on the production of blended portland cement in Brazil. *Environmental Geosciences*, v4:192-206.

www.ambientebrasil.com.br. Acesso em março 2005.

www.comciencia.com.br. Acesso em fevereiro 2005.

www.gmoravia.com.br. Acesso em maio de 2004.

www.geneastar.org. Acesso em janeiro de 2005.

www.reciclagem.pcc.usp.br. Acesso em janeiro de 2005.

www.revistaepoca.com.br. Acesso em março 2005.