

UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CONSTRUÇÃO CIVIL

DESEMPENHO DE MICROCONCRETOS FABRICADOS COM  
CIMENTO PORTLAND COM ADIÇÕES DE CINZA DE BAGAÇO DE  
CANA-DE-AÇÚCAR

Flávia Spitale Jacques Poggiali

Belo Horizonte

2010

FLÁVIA SPITALE JACQUES POGGIALI

DESEMPENHO DE MICROCONCRETOS FABRICADOS COM  
CIMENTO PORTLAND COM ADIÇÕES DE CINZA DE BAGAÇO DE  
CANA-DE-AÇÚCAR

Dissertação apresentada ao Programa de  
Pós-Graduação em Construção Civil da  
Universidade Federal de Minas Gerais,  
como parte dos requisitos para obtenção  
do título de Mestre em Construção Civil.

Orientadora: Prof<sup>a</sup>. Dr<sup>a</sup>. Maria Teresa Paulino Aguiar

Co-orientador: Prof. Dr. Adriano de Paula Silva

Belo Horizonte

Escola de Engenharia da UFMG

2010

P746d Poggiali, Flávia Spitale Jacques  
Desempenho de microconcretos fabricados com cimento portland com  
adições de cinza de bagaço de cana- de-açúcar [manuscrito] / Flávia Spitale  
Jacques Poggiali. – 2010.  
149 f., enc. : il.

Orientadora: Maria Teresa Paulino Aguiar.  
Co-orientador: Adriano de Paula Silva

Dissertação (mestrado) – Universidade Federal de Minas Gerais, Escola de  
Engenharia.

Bibliografia: f. 132-149.

1. Construção civil - Teses. 2. Bagaço de cana - Teses. 3. Concreto – Teses. 4.  
Materiais de construção – Teses. I. Aguiar, Maria Teresa Paulino. II. Silva, Adriano  
de Paula. III. Universidade Federal de Minas Gerais. Escola de Engenharia.  
IV. Título.

CDU:691(043)

Ficha elaborada pelo Processamento Técnico da EEUFMG

FLÁVIA SPITALE JACQUES POGGIALI

**DESEMPENHO DE MICROCONCRETOS FABRICADOS COM  
CIMENTO PORTLAND COM ADIÇÕES DE CINZA DE BAGAÇO DE  
CANA-DE-AÇÚCAR**


Esta dissertação foi julgada adequada para a obtenção do título de Mestre em Construção Civil e aprovada em sua forma final pelo Programa de Pós-graduação em Construção Civil do Departamento de Engenharia de Materiais e Construção da Escola de Engenharia da Universidade Federal de Minas Gerais.

Belo Horizonte, \_\_\_\_ de \_\_\_\_\_ de 2010.

\_\_\_\_\_  
Prof. Dr. Antônio Neves de Carvalho Júnior  
Coordenador do Programa de Pós-Graduação em Construção Civil


Banca examinadora:

  
\_\_\_\_\_  
ORIENTADORA: Prof<sup>a</sup>. Dr<sup>a</sup>. Maria Teresa Paulino Aguiar (UFMG/DEMC)

  
\_\_\_\_\_  
CO-ORIENTADOR: Prof. Dr. Adriano de Paula Silva (UFMG/DEMC)

  
\_\_\_\_\_  
Prof. Dr. Túlio Hallak Panzera (UFSJ/DEMEC)

  
\_\_\_\_\_  
Prof. Dr. Ricardo André Fiorotti Peixoto (CEFET-MG/DEC)

  
\_\_\_\_\_  
Prof. M. Sc. Augusto Cesar da Silva Bezerra (CEFET-MG/Campus Araxá)

“Mas é claro que o sol vai voltar amanhã  
Mais uma vez eu sei  
Escuridão já vi pior de endoidecer gente sã  
Espera que o sol já vem.

Tem gente que está do mesmo lado que você  
Mas deveria estar do lado de lá  
Tem gente que machuca os outros  
Tem gente que não sabe amar  
Tem gente enganando a gente  
Veja a nossa vida como está  
Mas eu sei que um dia a gente aprende  
Se você quiser alguém em quem confiar  
Confie em si mesmo  
Quem acredita sempre alcança!

Mas é claro que o sol vai voltar amanhã  
Mais uma vez eu sei  
Escuridão já vi pior de endoidecer gente sã  
Espera que o sol já vem.

Nunca deixe que lhe digam que não vale a pena  
Acreditar no sonho que se tem  
Ou que seus planos nunca vão dar certo  
Ou que você nunca vai ser alguém  
Tem gente que machuca os outros  
Tem gente que não sabe amar  
Mas eu sei que um dia a gente aprende  
Se você quiser alguém em quem confiar  
Confie em si mesmo  
Quem acredita sempre alcança!”

Renato Russo

## AGRADECIMENTOS

A Deus por estar ao meu lado e me dar forças, saúde, paz e perseverança para realizar todos os meus sonhos e projetos.

Ao meu amado pai, que sempre nos ensinou a alegria de viver. À minha mãe, por me incentivar a seguir em frente. À Marilda, mãe e amiga, por ser um exemplo de mulher, e por cuidar sempre de mim. Aos meus sete lindos irmãos, peças fundamentais na minha vida: Daniel, Pablo, Paloma, Gustavo, Paula, Ricardo e Vinícius.

Ao vovô Paulo, que me ensinou a apreciar a verdadeira música. À vovó Nilza, que antes de virar estrela me ensinou a batalhar sempre pela minha profissão e independência. Onde quer que vocês estejam agora, sinto sempre vocês aqui dentro do meu coração... ai que saudade! Às vovós Teresa e Marilda, pelo carinho e consideração de sempre.

A toda minha família, pela credibilidade e incentivo ao meu trabalho e pela compreensão de minha ausência em tantos momentos importantes.

À Prof<sup>a</sup>. Dr<sup>a</sup>. Maria Teresa Paulino Aguilár pelo incentivo, dedicação, competência, amizade e presença constante durante todo o processo de execução do trabalho.

Às grandes e verdadeiras amigas que construí durante o meu curso de mestrado e que participaram ativamente de todo o processo. Obrigada Marcela e Paula, pelo apoio, paciência, ajuda, amizade, confiança, incentivo e pelo ombro amigo nas horas difíceis. E ao meu co-orientador do coração, Augusto, por toda a ajuda e pela grande amizade em todos os momentos: sem você esse sonho não teria sido completo.

À Heloísa, grande amiga que por tantas vezes foi minha confidente, e me ajudou a ter tranquilidade e paz para conseguir alcançar meus objetivos.

Aos professores do Departamento de Materiais de Construção da Escola de Engenharia / UFMG, pelas valiosas colaborações na ajuda da pesquisa bibliográfica e colaborações técnicas.

Ao Grupo Carlos Lira, em especial à Usina Caeté, na cidade de Delta/MG, pelo fornecimento das cinzas para a presente pesquisa.

Ao Centro de Microscopia Eletrônica da UFMG.

À Lafarge Brasil, em especial ao Marcos, Márcia e Adilson, pela disponibilidade, fornecimento de material para a pesquisa e pela atenção dedicadas por toda a equipe.

Ao CEFET/MG e toda a equipe que me ajudou nas horas mais difíceis em laboratório, principalmente ao Leandro e Matheus.

Enfim, agradeço a todos que colaboraram significativamente na execução deste trabalho, tanto do ponto de vista prático (fornecimento de dados, orientações, sugestões, etc.) como do ponto de vista psicológico. Foi essencial contar com o apoio, compreensão, estímulo e carinho de pessoas tão queridas.

Em especial, ao meu amado marido Guilherme, que compreendeu minha ausência, meu nervosismo e todo meu stress em vários momentos durante o desenvolvimento de meu trabalho, e que ainda assim continua me amando! Muito obrigada pelo amor, carinho, atenção, paciência, companheirismo e dedicação. É por você que me torno cada dia uma pessoa melhor.

“Na natureza nada se perde e nada se cria, tudo se transforma.”

Lavoisier



## RESUMO

A disponibilidade de cinza de bagaço de cana no Brasil é da ordem de 4 milhões de toneladas por ano. Visando minimizar o impacto ambiental desses resíduos e produzir concretos de baixo carbono, diversos pesquisadores estudam o desempenho de materiais cimentícios produzidos com adição de cinzas de bagaço de cana. A pozolanicidade e o efeito *filler* associados a esses resíduos podem depender das características da cana-de-açúcar, da temperatura de queima do bagaço e da granulometria das cinzas. Apesar dos potenciais benefícios da utilização da cinza como adição mineral, o maior obstáculo para o seu uso de forma efetiva está no fato de que cada usina produz cinzas de diferentes características físico-químicas, uma vez que um dos principais objetivos dessas indústrias é a cogeração de energia. Desta forma, seria interessante o uso das cinzas na fabricação do cimento, de forma similar à escória de alto-forno, uma vez que nesta etapa se pode ter um controle maior para produção de um aglomerante homogêneo. Neste contexto, este trabalho tem como objetivo avaliar o desempenho de microconcretos fabricados com clínquer, gesso e diferentes adições de cinzas de bagaço de cana, produzidas na Usina Caeté/MG. Para isto, as cinzas foram caracterizadas física e quimicamente e foi avaliado o desempenho mecânico e de durabilidade de microconcretos confeccionados com os diferentes teores de cinza. Os resultados de índice de atividade pozolânica e de condutividade indicam que a moagem influencia positivamente na reatividade das cinzas. O ensaio de perda ao fogo apresentou resultados em desacordo com a norma. Embora as cinzas fina e grossa moídas apresentem diferentes teores de  $\text{SiO}_2$  e grau de cristalinidade distintos, quando adicionadas aos microconcretos, proporcionaram o melhor desempenho com a utilização de 10% e 15% de cinzas.

Palavras-chave: cinza de bagaço de cana-de-açúcar, adições minerais, microconcreto, sustentabilidade, efeito pozolânico, *filler*.

## ABSTRACT

The availability of the sugarcane bagasse in Brazil is estimated in 4 million metric tonnes per year. Aiming to minimize the environmental impacts of this waste and to produce low carbon concretes, various researchers have studied the performance of cementitious materials produced with the addition of sugarcane bagasse ashes. The pozzolanicity and the *filler* effect of this waste can be affected by the characteristics of the sugarcane, the bagasse burning temperature and the particle sizes of the ashes. Despite the potential benefits of using the ashes as a mineral additive, the biggest hurdle for its effective application resides in the fact that each milling industry produces ashes with different physicochemical characteristics, considering that they are focused only on the cogeneration of energy. Therefore, the use of these ashes in the production of cement becomes interesting in a similar way that blast furnace slag is used, since it is easier to control the production of a homogeneous binder in this stage. In this context, this work aims to evaluate the performance of microconcretes made with clinker, plaster and various additions of sugarcane bagasse, supplies by Caeté Mill, situated in Minas Gerais State. The ashes had their physical and chemical properties identified and the performance of microconcretes made with different concentrations of ashes was investigated. The results for the pozzolanic activity and conductivity indexes indicated that the grinding has a positive effect on the reactivity of the ashes. The loss on ignition testing were not in accordance with the Brazilian standard. Although the fine and coarse willed ashes presented different levels of SiO<sub>2</sub> and crystallinity grades, the best performance was achieved when 10 and 15% of ashe was added into microconcretes.

Keywords: sugarcane bagasse ash, mineral additives, microconcrete, sustainability, pozzolanic effect, *filler*.

# SUMÁRIO

SUMÁRIO.....	xi
LISTA DE FIGURAS.....	xv
LISTA DE TABELAS .....	xxi
LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS.....	xxiii
LISTA DE SÍMBOLOS.....	xxvii
1. INTRODUÇÃO .....	30
2. OBJETIVOS .....	33
3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	34
3.1 Energias alternativas.....	34
3.1.1 Energia renovável e não renovável.....	34
3.1.2 Biomassa.....	35
3.1.3 Cana-de-açúcar .....	39
3.2 Setor sucroalcooleiro.....	42
3.2.1 Produção de álcool e açúcar .....	42
3.2.2 Subprodutos da agroindústria canavieira e suas aplicações .....	43
3.2.3 Características do bagaço de cana-de-açúcar.....	46
3.2.4 Cogeração de energia .....	48
3.3 Adições minerais para o concreto .....	54

3.3.1	Generalidades.....	54
3.3.2	Efeito da adição em materiais cimentícios .....	55
3.3.3	Avaliação da atividade pozolânicas das adições .....	57
3.3.4	Diretrizes da utilização de adições minerais .....	59
3.3.5	Tipos de adições minerais .....	60
3.3.6	Importância do uso das adições na sustentabilidade.....	61
3.4	Cinza de bagaço de cana e sua potencialidade como aditivo mineral .....	63
3.4.1	Produção de cinza de bagaço de cana-de-açúcar.....	63
3.4.2	Aspectos da cinza relacionados ao meio ambiente .....	64
3.4.3	Características das cinzas .....	67
3.4.4	Estudos sobre a cinza do bagaço de cana-de-açúcar .....	74
4.	MATERIAIS E MÉTODOS.....	85
4.1	Materiais.....	85
4.2	Procedimento experimental.....	89
4.2.1	Análise macro e microestrutural.....	90
4.2.2	Massa específica .....	91
4.2.3	Índice de atividade pozolânica.....	92
4.2.4	Condutividade elétrica .....	94
4.2.5	Perda ao fogo .....	95
4.2.6	Superfície específica.....	96
4.2.7	Espectrometria de fluorescência de raios X.....	96

4.2.8	Difração de raios X .....	97
4.2.9	Confeção dos microconcretos.....	98
4.2.10	Resistência à compressão.....	101
4.2.11	Determinação do módulo de elasticidade.....	102
4.2.12	Absorção de água .....	104
5.	RESULTADOS E DISCUSSÕES .....	105
5.1	Análise macro e microestrutural .....	105
5.1.1	Análise macroscópica .....	105
5.1.2	Análise microscópica .....	107
5.2	Massa específica.....	110
5.3	Índice de atividade pozolânica (IAP) .....	110
5.4	Condutividade elétrica .....	112
5.5	Perda ao fogo.....	113
5.6	Superfície específica .....	114
5.7	Espectrometria de fluorescência de raios X .....	116
5.8	Difração de raios X.....	118
5.9	Resistência à compressão .....	120
5.10	Módulo de elasticidade .....	126
5.11	Absorção de água .....	128
5.12	Considerações finais.....	129
6.	CONCLUSÕES .....	130

7. SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS .....	132
8. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....	133

## LISTA DE FIGURAS

Figura 3.1 - Matriz de consumo final de energia nos anos de 1973 e 2006 (ANEEL, 2008). .....	36
Figura 3.2 - Matriz de oferta de energia elétrica no Brasil em 2007 (ANEEL, 2008). 37	
Figura 3.3 - Produção mundial de etanol (ANEEL, 2008).....	37
Figura 3.4 - Usinas de biomassa em operação em novembro de 2008. Fonte: (ANEEL, 2008). .....	38
Figura 3.5 - Distribuição espacial da atividade canavieira nos biomas brasileiros (IBGE, 2005).....	39
Figura 3.6 - Distribuição espacial da atividade canavieira destacando a região de São Paulo, Triângulo Mineiro e Alto Paranaíba (adaptado IBGE, 2005). .....	40
Figura 3.7 - Área disponível para a ampliação da agricultura (adaptado de UNICA, 2004). .....	41
Figura 3.8 - Setor sucroalcooleiro: fluxograma da cadeia produtiva (PELLEGRINI, 2002). .....	42
Figura 3.9 - Esquema global do processo de produção de açúcar e álcool (adaptado de MOREIRA e GOLDEMBERG, 1999). .....	43
Figura 3.10 - Subprodutos da agroindústria canavieira e seus respectivos usos alternativos (adaptado de CORTEZ <i>et al.</i> , 1992).....	44
Figura 3.11 - (a) Polietileno verde com base no etanol de cana-de-açúcar e (b) objeto de arte confeccionado com o bagaço de cana-de-açúcar (UNICA, 2009b)...	45
Figura 3.12 - Bagaço de cana-de-açúcar em fotografia (a) e micrografia que evidencia sua estrutura fibrosa (b) (CORDEIRO, G. C., 2006).....	46

Figura 3.13 - Produção de energia elétrica – biomassa de cana-de-açúcar (IBGE, 2005). .....	50
Figura 3.14 - Cana-de-açúcar: corte, moagem, produção e queima do bagaço. (a) Corte da cana-de-açúcar, (b) transporte até a unidade industrial, (c) a cana é lavada, (d) a cana é desfibrada e enviada à moenda para a retirada do caldo, (e, f) depósito do bagaço a céu aberto, (g) esteira rolante para levar o bagaço à caldeira, (h) caldeira onde é queimado o bagaço, (i) cinzas residuais (Adaptado de SOUZA, G. N. et al., 2007a).....	51
Figura 3.15 - Resíduo da cana: biomassa vegetal para produção de eletricidade e combustível (FAPESP, 2010a).....	53
Figura 3.16 - Esquemas bidimensionais para a estrutura do (a) dióxido de silício cristalino e do (b) dióxido de silício não cristalino (CALLISTER, 2006). .....	58
Figura 3.17 - Fluxograma simplificado da produção de cinza de bagaço de cana-de-açúcar (CBCA) (FREITAS, 2005). .....	64
Figura 3.18 - Bagaço de cana-de-açúcar (a) e diferentes cinzas residuais geradas após a queima do bagaço em caldeira: cinza escura com alto teor de carbono, característico de combustão incompleta (b), cinza com menor teor de carbono (c) e cinza gerada após combustão completa (d) (CORDEIRO, G. C., 2006). .....	67
Figura 3.19 - Morfologia das partículas da cinza do bagaço de cana-de-açúcar (CORDEIRO, G. C., 2006). A presença de partículas de quartzo também pode ser observada. (Imagem obtida por microscopia eletrônica de varredura com detecção por elétrons retroespalhados – aumento de 1000 vezes).....	71
Figura 3.20 - Imagens por Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) da cinza do bagaço de cana-de-açúcar depois de 8 minutos (a) e 240 minutos (b) em moagem vibratória (CORDEIRO, G. C., 2009b).....	72
Figura 3.21 - Variação da resistência à compressão nas idades de 1, 3, 7 e 28 dias (SINGH, <i>et al.</i> , 2000). .....	76



Figura 3.22 - Resistência à compressão dos concretos aos 7, 28, 90 e 180 dias (CORDEIRO, G. C. <i>et al.</i> , 2006).....	77
Figura 3.23 - Absorção de água por capilaridade dos concretos (CORDEIRO, G. C. <i>et al.</i> , 2006).....	77
Figura 3.24 - (A.) Resistência à compressão aos 7 dias nas argamassas incorporadas com resíduos; (B.) Idem aos 28 dias (PAULA <i>et al.</i> , 2008). C1 (0% CBCA), C2 (10% CBCA), C3 (20% CBCA), C4 (30% CBCA). ....	78
Figura 3.25 - Resistência à compressão da cinza de bagaço de cana misturada ao cimento em argamassas (GANESAN <i>et al.</i> , 2007b).....	79
Figura 3.26 - Comparativo do aumento da resistência com o tempo (SOUZA, G. N. <i>et al.</i> , 2007a).....	80
Figura 3.27 - Comportamento das resistências para 3, 7 e 28 dias em função dos teores de CBC (NUNES <i>et al.</i> , 2008). ....	81
Figura 3.28 - Valores de resistência à compressão dos concretos mantidos em água e em solução de MgSO <sub>4</sub> – 1365 dias de exposição (CORDEIRO, G. C. <i>et al.</i> , 2009a). .....	82
Figura 3.29 - Valores médios de absorção por capilaridade para diferentes tempos de absorção (MARTINS e ZANELLA, 2009). T1 (0% CBCA), M1 (30% CBCA), M2 (50% CBCA), M3 (100% CBCA).....	83
Figura 4.1 - Localização do Município Delta (Adaptado PORTAL MINAS-GERAIS.NET, 2010).....	85
Figura 4.2 - Estufa utilizada para a secagem das cinzas. ....	87
Figura 4.3 - Esferas de alumina sinterizada utilizadas no moinho.....	88
Figura 4.4 - Moinho piloto utilizado na moagem do cimento.....	89
Figura 4.5 - Fluxograma do procedimento experimental. ....	90

Figura 4.6 - Equipamento para ensaio de Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV). .....	91
Figura 4.7 - Frascos de Le Chatelier utilizados para realizar o ensaio de massa específica das cinzas. ....	92
Figura 4.8 - Condutivímetro medindo condutividade e temperatura da solução de $\text{Ca(OH)}_2$ saturada. ....	94
Figura 4.9 - Mufla utilizada para o ensaio de perda ao fogo.....	95
Figura 4.10 - Equipamento utilizado para o peneiramento do cimento.....	96
Figura 4.11 - Equipamento para ensaio de espectrometria de fluorescência de raios X - AXIOS DY 758 (Fornecido pela Lafarge Brasil). ....	97
Figura 4.12 - Difrator Philips, modelo PW1710.....	98
Figura 4.13 - Misturador mecânico utilizada para misturar os diferentes traços de microconcretos. ....	100
Figura 4.14 - Moldes utilizadas para a confecção dos corpos de prova de microconcretos. ....	100
Figura 4.15 - Corpos de prova desmoldados e devidamente identificados (a) e colocados em um recipiente para a cura (b).....	101
Figura 4.16 - Equipamento de ensaios de compressão. ....	102
Figura 4.17 - Ensaio de módulo de elasticidade por frequência ressonante forçada. ....	103
Figura 4.18 - Frequência ressonante longitudinal aproximada (CNS Eletronics, 1995). ....	103
Figura 5.1 - Cinzas de bagaço de cana-de-açúcar <i>in natura</i> grossa (a) e fina (b) e depois do processo de beneficiamento através da moagem, grossa moída (c) e fina moída (d). ....	106

Figura 5.2 - Cinzas de bagaço de cana-de-açúcar grossa <i>in natura</i> (a) e fina <i>in natura</i> (b) antes da moagem, com identificação da presença visível de quartzo. ...	107
Figura 5.3 - Cinza grossa <i>in natura</i> seca.....	107
Figura 5.4 - Microscopia Eletrônica de Varredura da cinza de bagaço de cana-de-açúcar “ <i>in natura</i> ” grossa.....	108
Figura 5.5 - Microscopia Eletrônica de Varredura da cinza de bagaço de cana-de-açúcar “ <i>in natura</i> ” fina.....	109
Figura 5.6 - Microscopia eletrônica de varredura da cinza de bagaço de cana-de-açúcar fina – identificação de partículas de quartzo.....	109
Figura 5.7 - Resistência à compressão em microconcretos confeccionados para avaliação do IAP de cinzas <i>in natura</i> .....	111
Figura 5.8 - Resistência à compressão em microconcretos confeccionados para avaliação do IAP das cinzas moídas.....	112
Figura 5.9 - Difração de raios X da cinza grossa moída.....	118
Figura 5.10 - Difração de raios X da cinza fina moída.....	119
Figura 5.11 - Resistência à compressão em relação à idade dos corpos de prova confeccionados com cinza fina moída, considerando o desvio padrão.....	120
Figura 5.12 - Resistência à compressão em relação ao teor de substituição de cinza fina moída.....	121
Figura 5.13 - Resistência à compressão em relação à idade dos corpos de prova confeccionados com cinza fina moída.....	121
Figura 5.14 - Resistência à compressão em relação à idade dos corpos de prova confeccionados com cinza grossa moída, considerando o desvio padrão.....	123
Figura 5.15 - Resistência à compressão em relação ao teor de substituição de cinza grossa moída.....	123

Figura 5.16 - Resistência à compressão em relação à idade dos corpos de prova confeccionados com cinza grossa moída.....	124
Figura 5.17 - Resistência à compressão em relação ao teor de substituição das cinzas. ....	126
Figura 5.18 - Módulo de elasticidade em microconcretos confeccionados com diferentes teores de cinza de bagaço moídas (grossa e fina). ....	127
Figura 5.19 - Absorção de água por imersão em microconcretos confeccionados com cinza de bagaço de cana.....	128

## LISTA DE TABELAS

Tabela 3.1 - Classificação das fontes de energia (adaptado de GOLDEMBERG e LUCON, 2007).....	35
Tabela 3.2 - Composição química elementar de amostras de bagaço de cana-de-açúcar seco (adaptado de CORDEIRO, G. C., 2006). ....	47
Tabela 3.3 - Características típicas das fibras de bagaço de cana-de-açúcar (adaptado de SARMIENTO e FREIRE, 1997).....	48
Tabela 3.4 - Classificação, composição e características das adições minerais para concreto (adaptado de MEHTA e MONTEIRO, 2008).....	56
Tabela 3.5 - Influência das temperaturas de queima do bagaço de cana-de-açúcar nas propriedades da cinza gerada (adaptado de PAULA, 2006).....	69
Tabela 3.6 - Teor de sílica da cinza do bagaço de cana-de-açúcar, segundo diversos autores (adaptado de MACEDO, P. C. <i>et al.</i> , 2009).....	70
Tabela 3.7 - Composição química determinada por fluorescência de raios X de cinzas da casca de arroz e do bagaço de cana-de-açúcar (CORDEIRO, G. C., 2006). .....	75
Tabela 4.1 - Perfil da carga do moinho de bolas. ....	87
Tabela 4.2 - Perfil da carga do moinho piloto (dados fornecidos pela Lafarge).....	88
Tabela 4.3 - Proporção de materiais utilizados para confecção de microconcretos com as cinzas <i>in natura</i> para a determinação do índice de atividade pozolânica. ...	93
Tabela 4.4 - Proporção de materiais utilizados para confecção de microconcretos com as cinzas moídas para a determinação do índice de atividade pozolânica.....	93

Tabela 4.5 - Proporção de materiais utilizados para confecção de microconcretos com cinza de bagaço de cana-de-açúcar fina moída. ....	99
Tabela 4.6 - Proporção de materiais utilizados para confecção de microconcretos com cinza de bagaço de cana-de-açúcar grossa moída. ....	99
Tabela 5.1 - Dados do ensaio de massa específica das cinzas <i>in natura</i> e moídas. ....	110
Tabela 5.2 - Condutividade elétrica pelo método proposto por Luxan <i>et al.</i> (1989).	113
Tabela 5.3 - Perda ao fogo das cinzas de bagaço de cana-de-açúcar.....	114
Tabela 5.4 - Caracterização dimensional do cimento (clínquer/gesso). ....	115
Tabela 5.5 - Área superficial específica (Blaine) nas cinzas fina e grossa moídas.	116
Tabela 5.6 - Composição química da cinza de bagaço de cana-de-açúcar grossa moída (Adaptado dos dados fornecidos pela Lafarge). ....	117
Tabela 5.7 - Composição química da cinza de bagaço de cana-de-açúcar fina moída (Adaptado dos dados fornecidos pela Lafarge). ....	117
Tabela 5.8 - Principais resultados das cinzas estudadas ( <i>in natura</i> e moída). ....	129

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas

ANEEL - Agência Nacional de Energia Elétrica

atm - atmosfera

BPF - óleo combustível derivado do petróleo

°C - grau Celsius

CBC - cinza de bagaço de cana

CBCA - cinza de bagaço de cana-de-açúcar

CCA - cinza da casca de arroz

CEFET-MG - Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais

CIESP - Centro das Indústrias do Estado de São Paulo

cm - centímetro

cm<sup>2</sup> - centímetro quadrado

cm<sup>3</sup> - centímetro cúbico

COPASA - Companhia de Saneamento de Minas Gerais

CPI - cimento Portland comum (clínquer e gesso)

CPI-S - cimento Portland comum com 95 a 99% de clínquer e gesso

CPII-Z - cimento Portland comum com 76 a 94% de clínquer e gesso

CPIV - cimento Portland pozolânico com 45 a 85% de clínquer e gesso

CPV - cimento Portland de alta resistência inicial

CPV- ARI - cimento Portland de alta resistência inicial

CPs - corpos de prova

CV - cavalo-vapor

DEMC - Departamento de Engenharia de Materiais e Construção

dm<sup>3</sup> - decímetro cúbico

DRX - difração de raios X

EDS - espectrômetro de raios X dispersivo em energia

FAPESP - Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo

FIESP - Federação das Indústrias do Estado de São Paulo

g - grama

GPa - giga Pascal

h - hora

ha - hectare

IAP - índice de atividade pozolânica

IBGE - Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística

ICDD - International Centre for Diffraction Data

IPT - Instituto de Pesquisas Tecnológicas

kcal - quilocaloria

kg - quilograma

kgf - quilograma-força



kHz - quilohertz

km<sup>3</sup> - quilômetro cúbico

kWh - quilowatt-hora

m<sup>2</sup> - metro quadrado

m<sup>3</sup> - metro cúbico

MAPA - Ministério da agricultura, pecuária e abastecimento

MEV - microscopia eletrônica de varredura

MG - Minas Gerais

MJ - mega joule

ml - mililitro

mm - milímetro

MME - Ministério de Minas e Energia

MPa - mega Pascal

mS - microsiemens

MW - mega-watt

NBR - Norma Brasileira

NOC - Grupo Novos Olhares sobre a Construção

PET - Politereftalato de etileno

RPM - rotações por minuto

S/A - Sociedade Anônima

tc - tonelada de cana

tep - tonelada equivalente de petróleo

ton - tonelada

$\mu\text{m}$  - micrômetro

UFMG - Universidade Federal de Minas Gerais

UNICA - União da Indústria de Cana-de-açúcar

USP - Universidade de São Paulo

V - volts

## LISTA DE SÍMBOLOS

# - malha de peneiras

% - porcentagem

> - maior

< - menor

$\alpha$  - alfa

$\theta$  - teta

$\square$  - massa específica

$\text{Al}_2\text{O}_3$  - óxido de alumínio (alumina)

C - carbono

$\text{C}_3\text{A}$  - aluminato tricálcico

$\text{C}_4\text{A}_3\text{S}$  - sulfoaluminato de cálcio

$\text{C}_5\text{H}_5\text{N}$  - piridina

$\text{C}_5\text{H}_8\text{O}_4$  - hemicelulose

$\text{C}_5\text{H}_{10}\text{O}_5$  - celulose

$\text{C}_6\text{H}_5\text{OH}$  - fenol

$\text{C}_6\text{H}_{12}\text{O}_6$  - glicose

$\text{C}_7\text{H}_{10}\text{O}_3$  - lignina

Ca - cálcio

CaO - óxido de cálcio (cal)

Ca(OH)<sub>2</sub> - hidróxido de cálcio, cal hidratada ou cal extinta

CH<sub>4</sub> - metano

C-S-H - silicato de cálcio hidratado

Cl - cloro

CO - monóxido de carbono

CO<sub>2</sub> - dióxido de carbono

Cr - cromo

CS - monossulfeto de carbono

CuK $\alpha$  - radiação monocromática, método de varredura contínua

H<sub>2</sub> - hidrogênio

H<sub>2</sub>O - água

H<sub>4</sub>SiO<sub>4</sub> - ácido monossílico

I - Iodo

FeO<sub>3</sub> - óxido de ferro

Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> - óxido de ferro III (hematita)

K - potássio

K<sub>2</sub>O - óxido de potássio

Mg - magnésio

MgO - óxido de magnésio

MgSO<sub>4</sub> - sulfato de magnésio

$N_2$  - nitrogênio

Na - sódio

$Na_2O$  - óxido de sódio

Ni - níquel

$NO_2$  - dióxido de nitrogênio

$NO_x$  - óxido de nitrogênio

$O_2$  - oxigênio

OH - hidróxido

$P_2O_5$  - pentóxido de fósforo

Si - silício

$SiO_2$  - dióxido de silício ou sílica

$SO_2$  - dióxido de enxofre

$SO_3$  - trióxido de enxofre ou anidrido sulfúrico

SrO - óxido de estrôncio

$TiO_2$  - óxido de titânio

$U_3O_8$  - óxido de urânio

Zn - zinco

$ZrO_2$  - dióxido de zircônio

# 1. INTRODUÇÃO

A biomassa é uma das fontes potenciais para a produção de energia. Dentre as principais biomassas utilizadas para a cogeração de energia em termoelétricas está o bagaço de cana-de-açúcar proveniente da produção de álcool e açúcar. Cerca de 84% das termoelétricas brasileiras utilizam bagaço de cana-de-açúcar no processo de geração de energia, sendo que aproximadamente 8% destas usinas estão implantadas no estado de Minas Gerais (ANEEL, 2008). A energia proveniente da biomassa complementa a energia gerada nas hidrelétricas no período de seca, ou seja, período em que o país apresenta maior vulnerabilidade energética. Sua geração é considerada um processo sustentável, na medida em que consome um passivo ambiental e conseqüentemente melhora a qualidade de vida da sociedade (COELHO *et al.*, 1998b; JARDIM, 2007).

A previsão de colheita no ano de 2010 em todo o país foi de aproximadamente 687,3 milhões de toneladas de cana-de-açúcar (IBGE, 2010). O processamento dessa cana produzirá aproximadamente 15 milhões de toneladas de bagaço de cana-de-açúcar. A queima desse bagaço para geração de vapor em caldeiras gera cerca de 2,4% de cinzas em relação à massa de bagaço (FIESP/CIESP, 2001; LIMA, C. C., 2006). Somente no estado de Minas Gerais, a queima do bagaço disponibilizará cerca de 360 mil toneladas de cinzas em um ano. O agronegócio do setor sucroalcooleiro possui perspectiva de grande crescimento, fazendo com que aumente proporcionalmente a área de plantio de cana-de-açúcar e o volume de bagaço de cana e conseqüentemente de cinzas (ANEEL, 2008).

A primeira destinação natural das cinzas do bagaço de cana-de-açúcar (CBCA) seria como adubação orgânica. No entanto, o alto teor de sílica, a baixa porcentagem de nutrientes presentes e a dificuldade de degradação torna esse uso inadequado (CORDEIRO, G. C., 2006; LIMA, S. A. *et al.*, 2009). Em outros países, como Índia e Argentina, vários estudos, com águas residuais industriais, mostram a viabilidade de

utilização dessas cinzas para adsorção de materiais tóxicos, como o cromo (Cr) (GUPTA *et al.*, 1999); cádmio (Cd) e níquel (Ni) (SRIVASTAVA *et al.*, 2007), zinco (Zn) (GUPTA e SHARMA, 2003; SRIVASTAVA *et al.*, 2007), piridina (C<sub>5</sub>H<sub>5</sub>N) e seus derivados (LATAYE *et al.*, 2006; LATAYE *et al.*, 2008), fenol (C<sub>6</sub>H<sub>5</sub>OH) (SRIVASTAVA *et al.*, 2008) iodo (I) (CASTRO, J. B. *et al.*, 2000), dentre outros. Uma terceira possibilidade de uso estaria relacionada à fabricação de materiais cimentícios.

Segundo Payá *et al.* (2002) a cinza do bagaço de cana-de-açúcar é um importante material para a confecção de argamassas e concretos devido à alta quantidade de silício (Si) e de óxido de alumínio (Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>). A cinza, que contém dióxido de silício (SiO<sub>2</sub>), dependendo das condições de queima e de sua granulometria, apresenta características químicas e físicas que podem desenvolver atividade pozolânica e/ou efeito *filler* (PAULA, 2006; NUNES *et al.*, 2008). Estudos recentes indicam que cinzas de bagaço de cana com alto teor de sílica reativa (ou seja, com estrutura amorfa), alto grau de pureza (reduzido teor de carbono), em granulometria relativamente fina e na forma lamelar, seriam ideais para a produção de concretos duráveis, de forma similar às cinzas volantes e cinzas provenientes da queima da casca de arroz (PAYÁ *et al.*, 2001; TASHIMA, 2006; ZUCCO e BERALDO, 2008). Alguns estudos mostram que as características químicas das cinzas dependem do solo de plantio e do tipo de cana, e das condições de queima do bagaço (VALENCIANO e FREIRE, 2004; FREITAS, 2005; CORDEIRO, G. C., 2006; SALES *et al.*, 2010). Fairbairn *et al.* (2010) concluíram em seus estudos que a cinza do bagaço de cana-de-açúcar exibe um efeito pozolânico que, quando adicionada ao cimento, melhora o desempenho do material.

Neste contexto, este trabalho se propõe a avaliar as propriedades físicas e mecânicas de microconcretos (compósitos cimentícios para fins estruturais sem adição de agregados graúdos) confeccionados com cimento CPI e diferentes teores de cinzas de bagaço de cana-de-açúcar. Este trabalho se insere em uma pesquisa mais ampla que estuda a produção de cimentos aditivados com cinza de bagaço de cana.

Os resultados deste trabalho podem contribuir para o estabelecimento da construção sustentável na medida em que se tornar viável a utilização do resíduo da cogeração de energia a partir do bagaço de cana-de-açúcar para a produção de concretos de baixo carbono duráveis.



## **2. OBJETIVOS**

O objetivo geral do trabalho é avaliar o desempenho de microconcretos confeccionados com cinzas de bagaço de cana-de-açúcar em substituição parcial ao cimento CPI (cimento Portland comum - clínquer e gesso). Entre os objetivos específicos estão:

- i - caracterização físico-química das cinzas de bagaço de cana;
- ii - estudo da influência da granulometria da cinza no desempenho mecânico e de durabilidade dos microconcretos;
- iii - avaliação da pozolanicidade das cinzas de bagaço de cana;
- iv - estudo da influência do teor de cinzas no desempenho mecânico e de durabilidade dos microconcretos.

### **3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA**

A seguir serão apresentados, na revisão bibliográfica, os tópicos mais relevantes sobre o tema abordado. Inicialmente são apresentados tópicos sobre energias alternativas, a contextualização da cinza de bagaço de cana-de-açúcar no setor sucroalcooleiro no Brasil, o conceito de adição mineral e sua importância quanto a aspectos técnicos, econômicos e ambientais. Logo após, o texto aborda as características das cinzas do bagaço de cana e seus estudos inerentes à sua aplicação em concretos.

#### **3.1 Energias alternativas**

##### **3.1.1 Energia renovável e não renovável**

As fontes de energia são classificadas em basicamente dois grupos: renováveis e não renováveis, segundo a Tabela 3.1. Esta classificação tem a ver com a relação entre a taxa de utilização e a taxa de formação do recurso energético.

Tabela 3.1 - Classificação das fontes de energia (adaptado de GOLDEMBERG e LUCON, 2007).

Fontes		Energia primária	Energia secundária	
Não renováveis	Fósseis	carvão mineral	termoeletricidade, calor, combustível para transporte	
		petróleo e derivados		
		gás natural		
	Nuclear	materiais fósseis	termoeletricidade,	
Renováveis	“Tradicionais”	biomassa primitiva: lenha de desmatamento	calor	
	“Convencionais”	potenciais hidráulicos de médio e grande porte	hidreletricidade	
		potenciais hidráulicos de pequeno porte		
	“Novas”	biomassa “moderna”: lenha replantada, culturas energéticas (cana-de-açúcar, óleos vegetais)	biocombustíveis (etanol, biodiesel), termoeletricidade, calor	
		outros	energia solar	calor, eletricidade e fotovoltaica
			geotermal	calor e eletricidade
eólica			eletricidade	
maremotriz e das ondas				

As fontes de energia não renovável são aquelas em que as reservas são limitadas, e podem demorar milhões de anos para que a natureza consiga reproduzi-las novamente. Exemplos de fontes fósseis são o petróleo e seus derivados, o carvão mineral, o gás natural, o xisto betuminoso, dentre outros, além da energia gerada através da fissão nuclear.

As energias renováveis são aquelas que utilizam como matéria-prima elementos renováveis pela natureza, como o sol, vento, chuva, marés e calor, e que são naturalmente reabastecidas pela natureza. Podem ser de origem eólica, solar, hídrica, das marés, geotérmica, do hidrogênio e provenientes da biomassa.

### 3.1.2 Biomassa

A biomassa é uma das fontes para produção de energia com maior potencial de crescimento a médio e longo prazo. Cada vez mais esta fonte de energia é utilizada

para obter eletricidade e biocombustíveis, como o biodiesel e o etanol. Devido à exaustão de recursos não renováveis e aos problemas ambientais, a biomassa é uma das principais alternativas para a diversificação da matriz energética, reduzindo a dependência de combustíveis fósseis, como o óleo diesel e a gasolina (CORDEIRO, G. C., 2006; MACEDO, P. C., 2009a; COELHO, 1999; PELLEGRINI, 2002).

Apesar do potencial energético, historicamente a biomassa tem sido pouco expressiva na matriz energética mundial, representando cerca de 13% do consumo mundial de energia primária, como mostra a Figura 3.1.

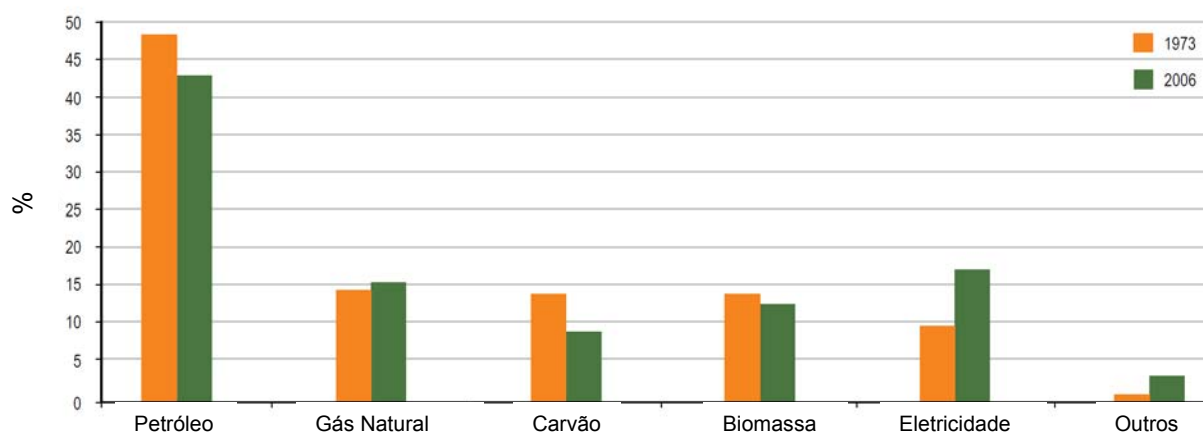


Figura 3.1 - Matriz de consumo final de energia nos anos de 1973 e 2006 (ANEEL, 2008).

O Brasil possui tradição e grande potencial na geração de energia através da biomassa, consequência de uma série de fatores como: o tamanho do país e a disponibilidade de terras para o plantio; a adequada temperatura do ambiente; a disponibilidade e o baixo custo da mão de obra e, o mais importante, o domínio da produção de biomassa e dos processos de conversão da mesma em energia, tanto no setor industrial como na agricultura (WALTER *et al.*, 2005). Segundo a ANEEL (2008), no Brasil a biomassa é a segunda fonte de energia elétrica, sendo superada apenas pela energia gerada por hidrelétricas, como mostra a Figura 3.2.

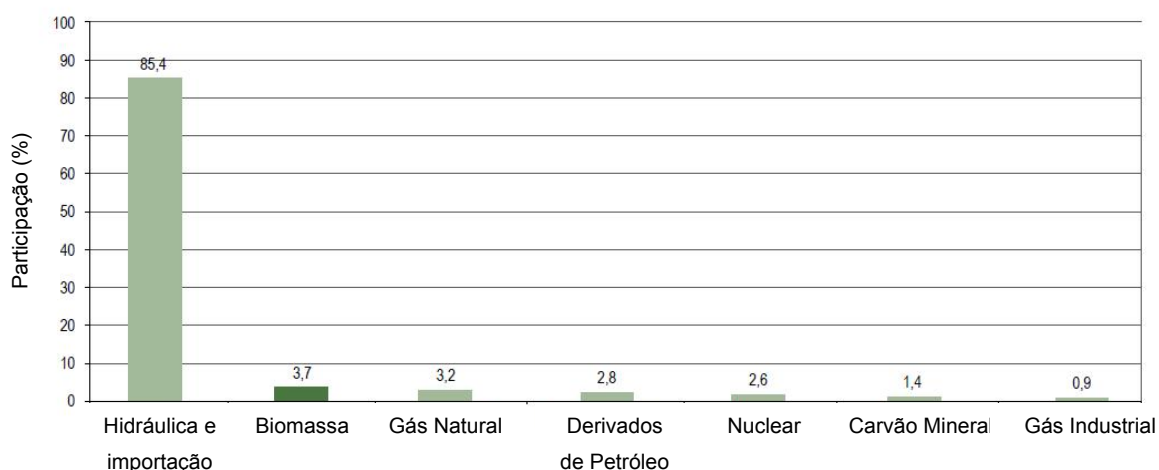


Figura 3.2 - Matriz de oferta de energia elétrica no Brasil em 2007 (ANEEL, 2008).

Segundo a ANEEL (2008), o Brasil está classificado mundialmente em segundo lugar na produção de etanol a partir de biomassa de origem vegetal, com potencial energético similar e menor custo que outros países, como os Estados Unidos e regiões como a União Européia (Figura 3.3).

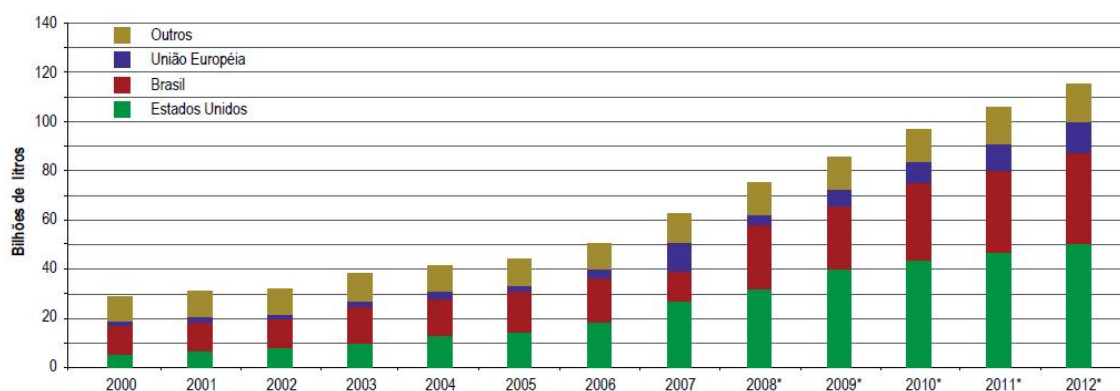


Figura 3.3 - Produção mundial de etanol (ANEEL, 2008)

(\*) Previsão

Em todo o território brasileiro, das 299 usinas de geração de energia a partir de biomassa listadas pela ANEEL (2008), 13 são abastecidas por licor negro com potência total de 944 MW; 27 por madeira (232 MW); 4 por biogás (45 MW); 3 por casca de arroz (21 MW) e 252 por bagaço de cana-de-açúcar (4 mil MW). O bagaço de cana representa cerca de 84% da biomassa utilizada no país, como mostra a Figura 3.4.



Figura 3.4 - Usinas de biomassa em operação em novembro de 2008. Fonte: (ANEEL, 2008).

### 3.1.3 Cana-de-açúcar

A cana-de-açúcar é uma das principais culturas agrícolas, fazendo parte da produção brasileira desde a época da colonização. Além de ser matéria-prima para uma demanda enorme de produtos, o beneficiamento da cana gera milhões de empregos diretos e indiretos, além de ser uma importante fonte de renda e desenvolvimento do país (PEDROSO *et al.*, 2009). A composição média da cana é de 14% de fibra, 12% de sacarose, 3% de impurezas e o restante de água (CORTEZ *et al.*, 1992).

A cana-de-açúcar é cultivada em todo o Brasil, mas se destaca nos estados de São Paulo, Paraná, Alagoas, Minas Gerais e Pernambuco, como mostra a Figura 3.5. O rendimento médio da cana-de-açúcar no ano de 2009 foi de 79.764 kg/ha (IBGE, 2010).

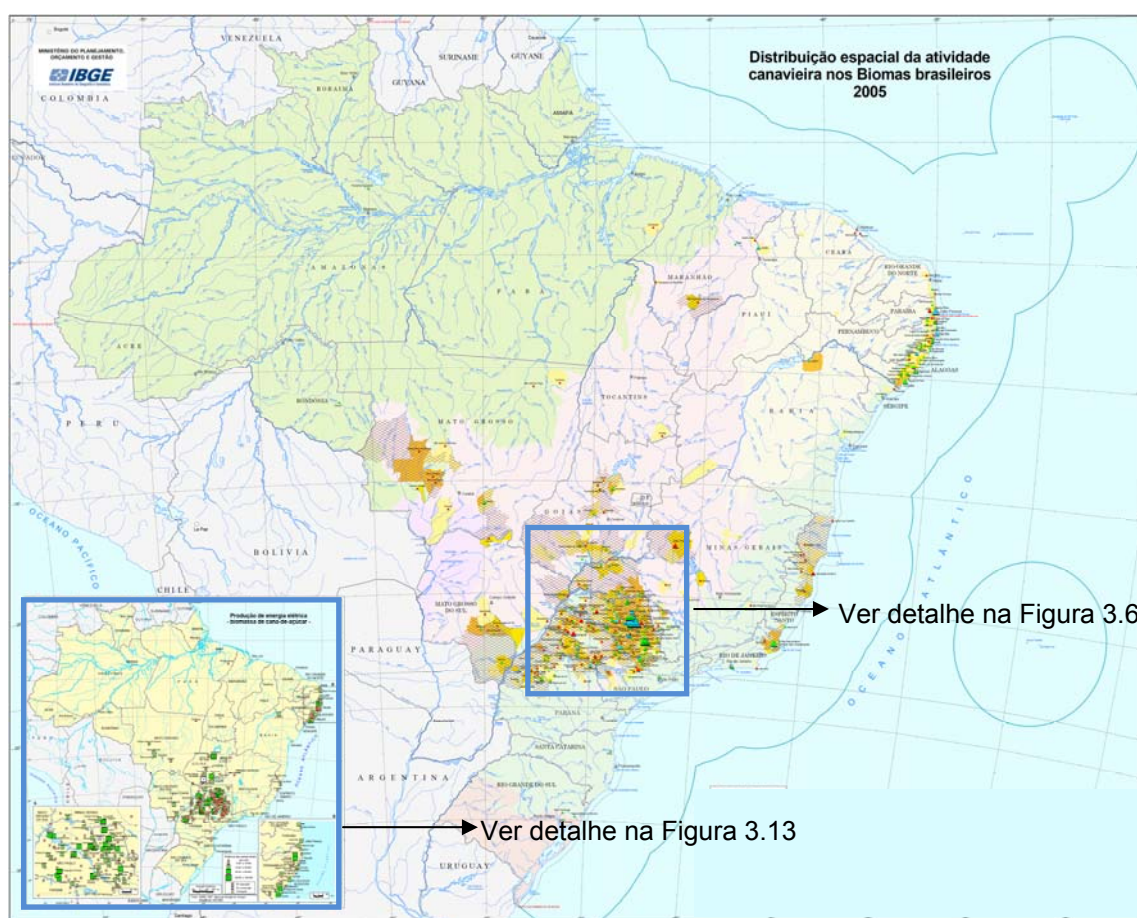


Figura 3.5 - Distribuição espacial da atividade canavieira nos biomas brasileiros (IBGE, 2005).

A Figura 3.6 destaca o setor sucroalcooleiro na região de São Paulo, Triângulo Mineiro e Alto Paranaíba, ilustrando a grande expansão da cana-de-açúcar, as indústrias de produção de álcool e as usinas de produção de açúcar.

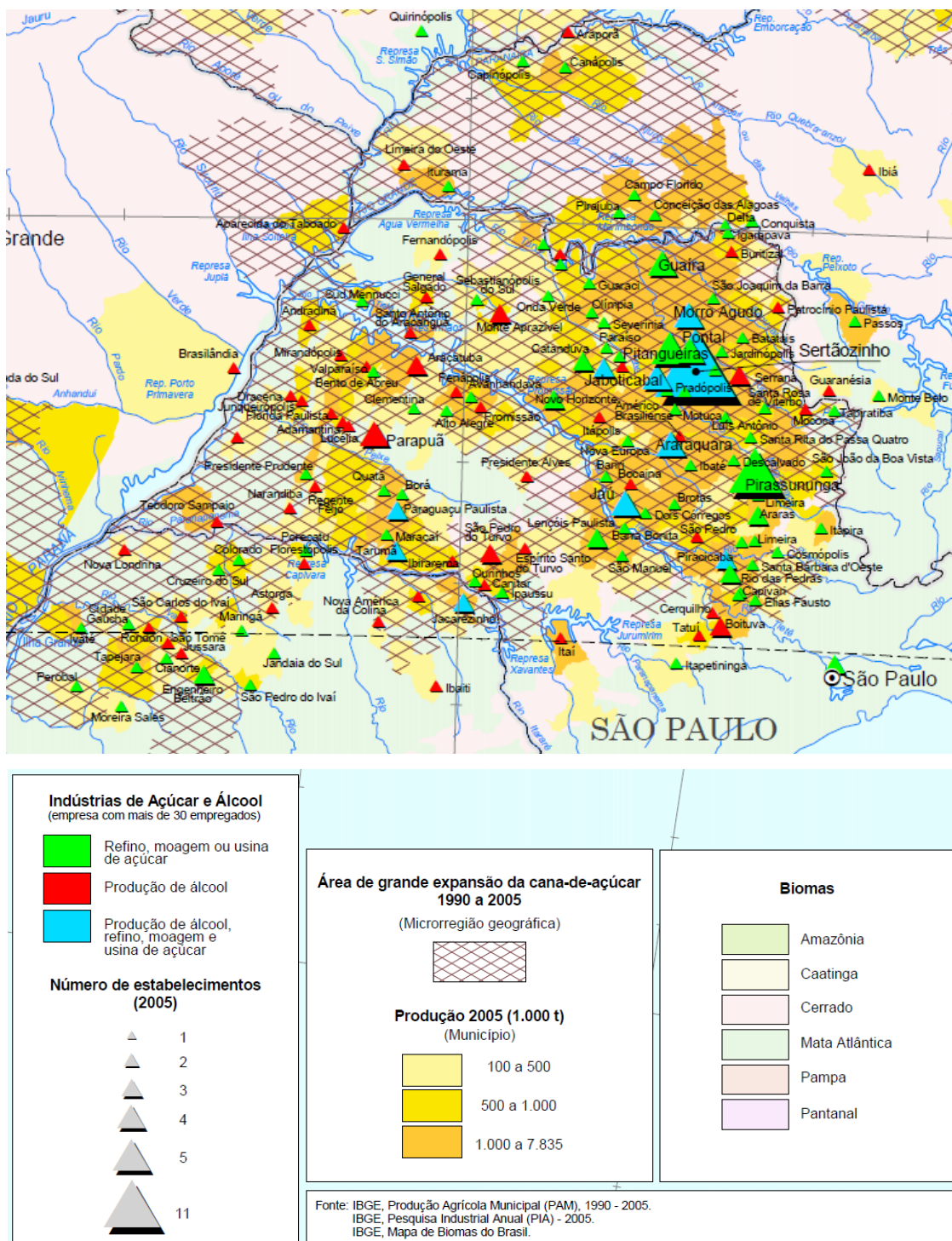


Figura 3.6 - Distribuição espacial da atividade canavieira destacando a região de São Paulo, Triângulo Mineiro e Alto Paranaíba (adaptado IBGE, 2005).



De acordo com o Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE, 2010), a produção de cana-de-açúcar na safra de 2009 foi de 687.290.114 toneladas, com perspectiva de crescimento de cerca de 0,65% no ano de 2010.

A área disponível para o plantio de cana-de-açúcar em todo o país está na ordem de 376 milhões de hectares, onde existe potencial de ampliação para o seu cultivo. Recentemente, a cana-de-açúcar vem se expandindo principalmente em áreas usadas previamente para a criação de gado. A área disponível para a ampliação da agricultura, sem desmatamento, é cerca de 110 milhões de hectares (Figura 3.7), aproximadamente 13% de todo o território brasileiro (WALTER *et al.*, 2005).

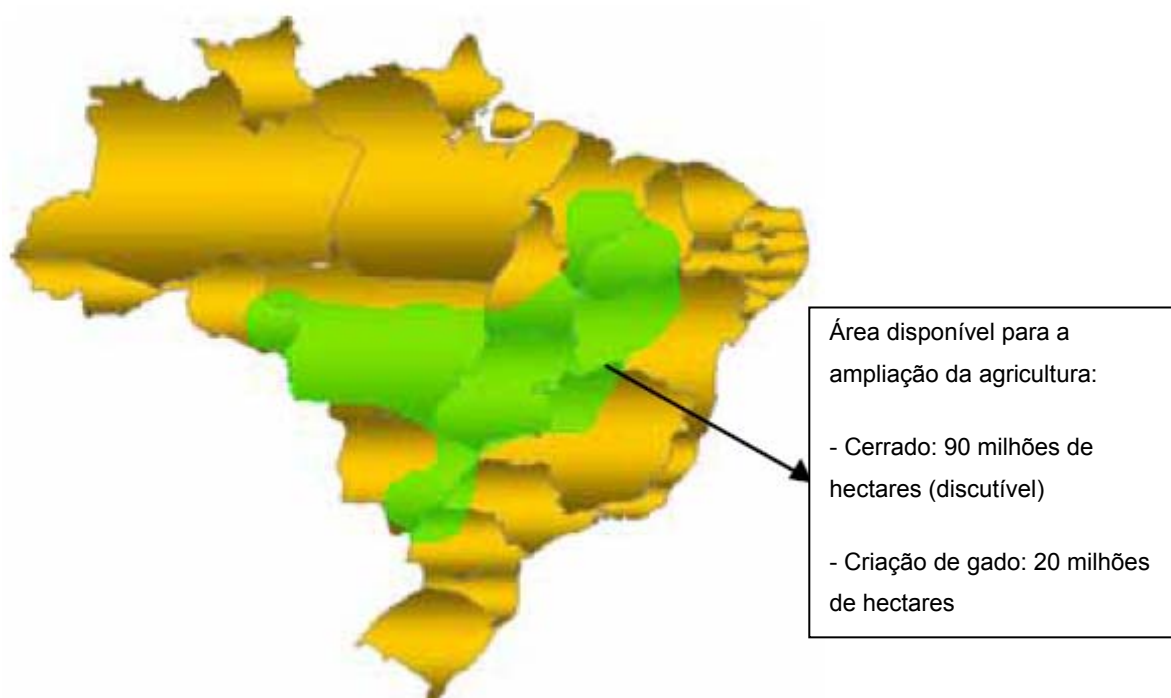


Figura 3.7 - Área disponível para a ampliação da agricultura (adaptado de UNICA, 2004).

Em relação ao valor energético, a cana-de-açúcar juntamente com seus derivados possui mais energia do que o álcool isoladamente. De acordo com Cortez *et al.* (1992) para cada tonelada de cana obtém-se cerca de 392.000 kcal em 70 litros de álcool, 560.000 kcal em 250 kg de bagaço úmido e 60.000 kcal em 11.830 litros de biogás obtidos a partir da biodigestão do vinhoto. Isso equivale a dizer que a energia contida na cana-de-açúcar e seus derivados superam a produzida pelo álcool isoladamente.

## 3.2 Setor sucroalcooleiro

### 3.2.1 Produção de álcool e açúcar

Considerado como o maior produtor mundial no setor sucroalcooleiro, o Brasil é responsável pela produção de cerca de 60% do álcool etílico consumido no planeta e é o maior produtor mundial de açúcar (PAULA *et al.*, 2008; LIMA, S. A. *et al.*, 2009). O fluxograma da cadeia produtiva do setor sucroalcooleiro está representado na Figura 3.8.

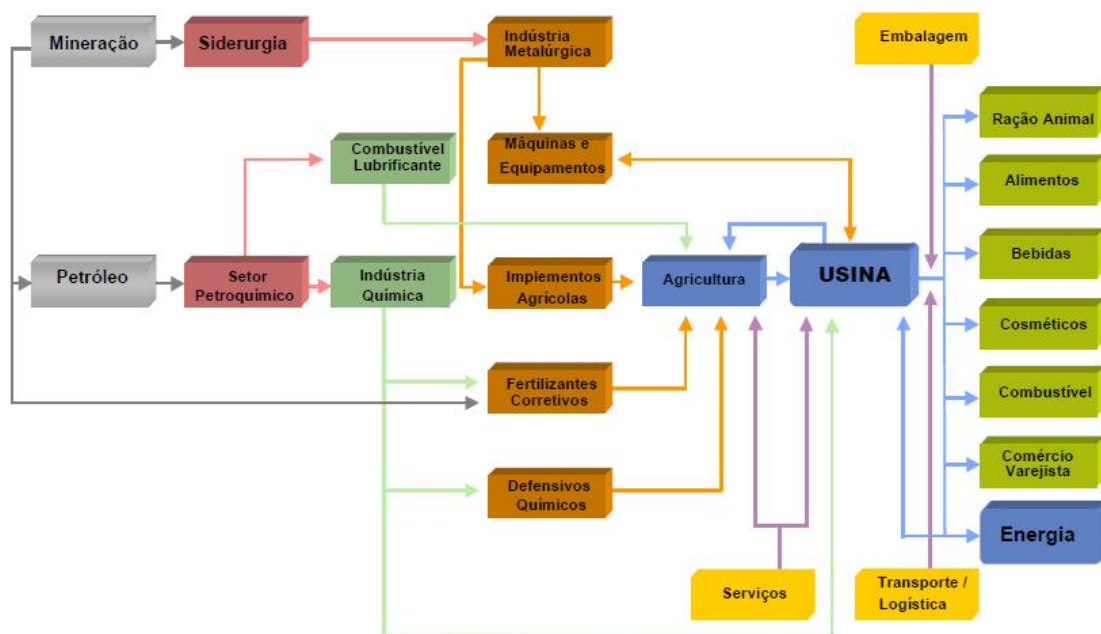


Figura 3.8 - Setor sucroalcooleiro: fluxograma da cadeia produtiva (PELLEGRINI, 2002).

A fabricação de álcool e de açúcar compreende as etapas de colheita e transporte da cana até a usina, lavagem e processamento. A partir daí, o processo de extração do caldo da cana se diferencia, sendo tratado para a produção do açúcar e/ou fermentado para produzir o álcool, como mostra a Figura 3.9.

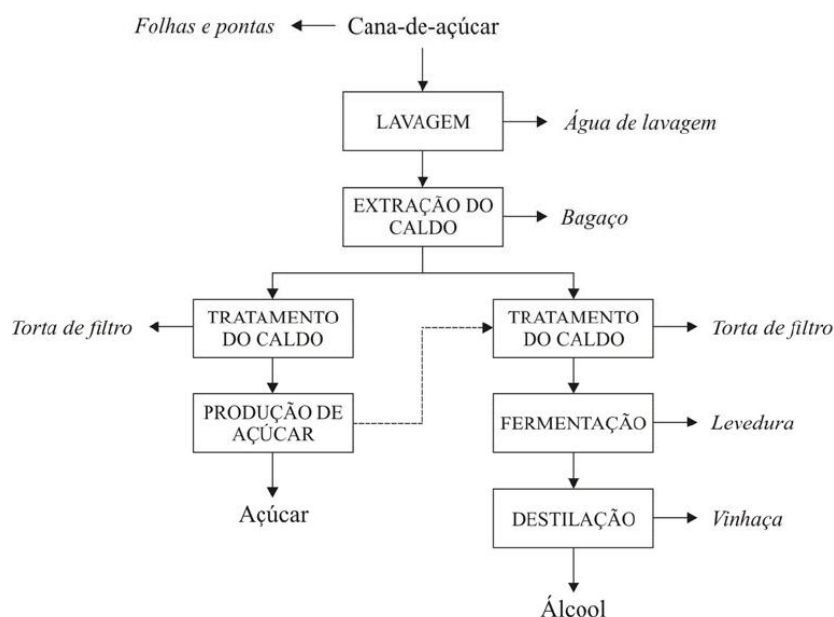


Figura 3.9 - Esquema global do processo de produção de açúcar e álcool (adaptado de MOREIRA e GOLDEMBERG, 1999).

### 3.2.2 Subprodutos da agroindústria canavieira e suas aplicações

Os principais subprodutos da indústria sucroalcooleira são folhas, pontas, palha, bagaço, torta de filtro, melaço, leveduras, vinhaça (também chamada de vinhoto ou restilo) e água de lavagem (CORTEZ *et al.*, 1992). Cada um desses subprodutos são reutilizados, a água de lavagem da cana antes do processo de moagem pode ser reutilizada na produção de biogás e na fertirrigação.

O bagaço é empregado como combustível (natural, briquetado, peletizado, enfardado) na produção de energia (eletricidade e vapor), hidrólise (rações, furfural, lignina), polpa de papel, aglomerados e celulose. As folhas e pontas podem ser utilizadas como forragem, além das mesmas empregadas pelo bagaço. A vinhaça é utilizada como fertilizante na adubação dos canaviais. A torta de filtro (subproduto do processo de clarificação do caldo na fabricação de açúcar) e a levedura (obtida depois da fermentação do caldo) são também empregadas na adubação. A Figura 3.10 ilustra ainda outras destinações desses resíduos.

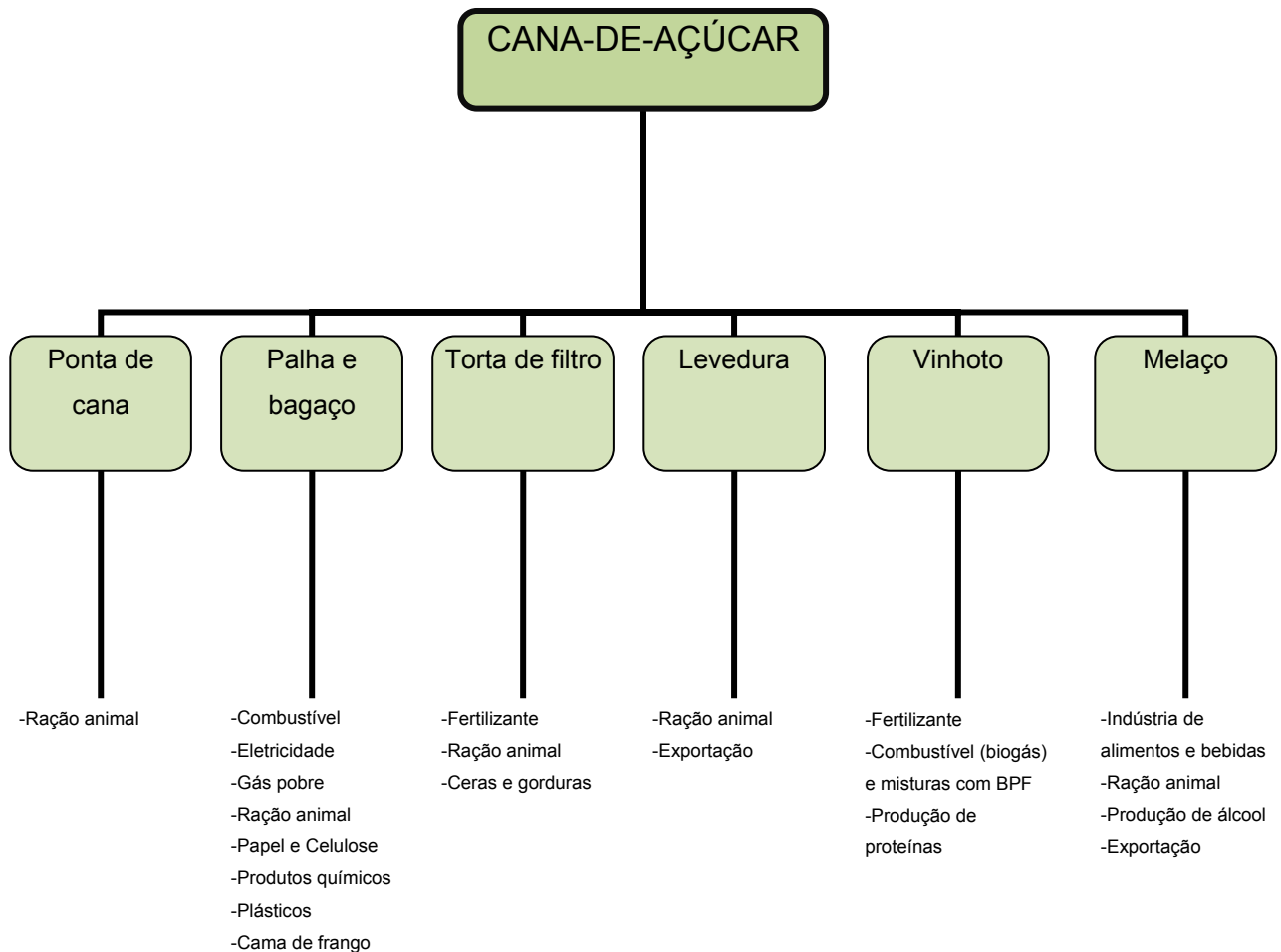


Figura 3.10 - Subprodutos da agroindústria canieira e seus respectivos usos alternativos (adaptado de CORTEZ *et al.*, 1992).

Os insumos do setor sucroalcooleiro podem ser aproveitados em vários setores, como matéria-prima para a produção de celulose, ração animal, objetos de arte (Figura 3.11), placas de aglomerados, produtos químicos (como o éter etílico, ácido acético, acetato de etila e dietilamina), concretos, além de outras possibilidades que ainda estão sendo pesquisadas, como a sua utilização para a produção de bioplástico (polietileno verde), adesivos, briquetes (alternativa ao carvão vegetal comum), fritas (para acabamento de peças cerâmicas), vitro-cerâmicas (matéria-prima já utilizada na confecção de painéis e tampas de vidro para fogão elétrico), pisos e azulejos, fibras sintéticas, produção de diesel, querosene, etanol celulósico (ou de segunda geração), biobutanol e outros produtos da alcoolquímica (CORTEZ

et al.,1992; SARMIENTO e FREIRE, 1997; UNICA, 2009a, 2009b, 2009c, 2010a, 2010b; FAPESP, 2010c).



Figura 3.11 - (a) Polietileno verde com base no etanol de cana-de-açúcar e (b) objeto de arte confeccionado com o bagaço de cana-de-açúcar (UNICA, 2009b).

O bioplástico é um dos produtos gerados a partir do bagaço de cana, sendo chamado de “bio” devido a dois aspectos: por ser biodegradável (levando até 180 dias para se deteriorar no ambiente) e por advir de fontes naturais. Sua escala de produção no Brasil ainda não é considerada suficiente para cobrir a demanda do mercado (UNICA, 2010a).

A Coca-Cola, desde abril de 2010, já adotou o bioplástico na produção de sua garrafa PET, chamada de “PlantBottle”, onde utiliza 30% de etanol derivado da cana-de-açúcar (**Erro! Fonte de referência não encontrada.**). Segundo estudos da UNICA (2010b), a produção de cada lote de 10 milhões de “PlantBottle”, com a capacidade de dois litros, vai representar uma redução de aproximadamente 550 toneladas de gás carbônico (CO<sub>2</sub>), equivalente ao que a atmosfera pode absorver, durante um ano, com a plantação de 78.540 árvores nativas.

Segundo os dados do IBGE (2010), o bagaço de cana-de-açúcar, gerado durante o processo de extração do caldo nas usinas, é o maior resíduo da agricultura brasileira.

### 3.2.3 Características do bagaço de cana-de-açúcar

Cada tonelada de cana-de-açúcar moída rende cerca de 250 kg de bagaço úmido, com média de 50% de umidade, cerca de 48% de fibras lignocelulósicas e de 2% a 3% de sólidos solúveis (CORTEZ *et al.*, 1992; FIESP/CIESP, 2001; KAWABATA, 2008). Sua composição é de aproximadamente 50% de celulose ( $C_5H_{10}O_5$ ), 20% de hemicelulose ( $C_5H_8O_4$ ) e 30% de lignina ( $C_7H_{10}O_3$ ) (QUINTERO-RAMIREZ, 2010). A Figura 3.12 ilustra o bagaço de cana-de-açúcar e detalhes de sua estrutura fibrosa, onde a imagem (b) foi obtida por microscopia eletrônica de varredura com detecção por elétrons retroespalhados – aumento de 80 vezes.

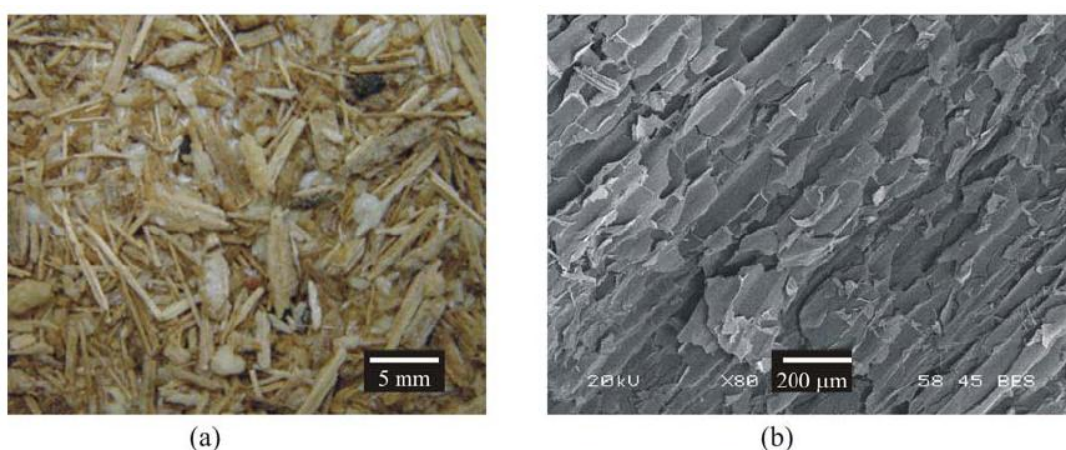


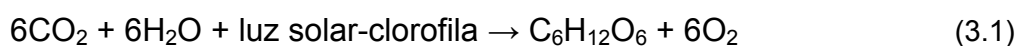
Figura 3.12 - Bagaço de cana-de-açúcar em fotografia (a) e micrografia que evidencia sua estrutura fibrosa (b) (CORDEIRO, G. C., 2006).

A composição química do bagaço de cana varia de acordo com o tipo de cana cultivada, com os tipos de fertilizantes e herbicidas utilizados e com fatores naturais como o clima, o solo e a água. A densidade do bagaço seco é de aproximadamente  $490 \pm 15 \text{ kg/m}^3$  (CORDEIRO, G. C., 2006). A Tabela 3.2 apresenta a composição química de algumas amostras de bagaço.

Tabela 3.2 - Composição química elementar de amostras de bagaço de cana-de-açúcar seco (adaptado de CORDEIRO, G. C., 2006).

Elemento	Quantidade (% , em massa)		
	NASSAR <i>et al.</i> (1996)	JOPAPUR e RAJVANSHI (1997)	JENKINS <i>et al.</i> (1998)
Carbono (C)	49,44	44,10	48,64
Hidrogênio (H <sub>2</sub> )	6,09	5,26	5,87
Oxigênio (O <sub>2</sub> )	40,57	44,40	42,82
Nitrogênio (N <sub>2</sub> )	-	-	0,16
Cinza	3,40	4,20	2,44

O bagaço é utilizado para atender as necessidades energéticas da indústria. A queima do bagaço de cana-de-açúcar na geração de energia libera carbono na atmosfera na forma de CO<sub>2</sub>. Porém, através da fotossíntese, a cultura da cana-de-açúcar anula o balanço de emissões de CO<sub>2</sub>. A equação 3.1 mostra que, a partir do CO<sub>2</sub>, da água, da energia solar e da clorofila, a cana produz glicose e oxigênio. Durante o ciclo de vida completo da biomassa, abrangendo o consumo direto e indireto de combustíveis fósseis, constata-se a emissão de CO<sub>2</sub>, sendo esse valor bem menor quando comparado com outras fontes de combustíveis fósseis (CORDEIRO, G. C., 2006).



O bagaço pode entrar em processo de deterioração durante o processo de armazenagem, pois o açúcar residual juntamente com a umidade e a presença de microorganismos estimula uma fermentação exotérmica, afetando diretamente as características do material. Para potencializar o aproveitamento do bagaço como insumo energético ou como matéria-prima industrial, este precisa passar por um processo de beneficiamento adequado que viabilize sua estocagem, reduzindo ao máximo o seu teor de umidade.

Os principais fatores que limitam o uso do bagaço *in natura* de forma mais abrangente são: umidade excessiva e a baixa densidade. A fim de melhorar essas

propriedades no bagaço, a empresa BAGATEX Brasileira Comercial criou um processo bioquímico de armazenamento, onde se consegue uma redução da umidade do bagaço para 20% em 20 dias através do processo de fermentação anaeróbia, liberando energia e evaporando parte da água do material. Concluído o processo, o bagaço pode ser estocado por até 24 meses, com um aumento de 39% de vapor gerado na caldeira em relação à utilização do bagaço *in natura* e um aumento na densidade de 5,6 vezes à do material *in natura* (CORTEZ *et al.*, 1992).

Estudos mostram a viabilidade da utilização das fibras do bagaço de cana-de-açúcar nas propriedades físicas e mecânicas tanto de compósitos cimentícios (AGGARWAL, 1995; SARMIENTO e FREIRE, 1997; MONTEIRO *et al.*, 1998; BILBA *et al.*, 2003; BILBA e ARSÈNE, 2008; ONÉSIPPE *et al.*, 2010), quanto de compósitos biodegradáveis (CAO *et al.*, 2005). Quando as fibras trabalharem em matrizes cimentícias, deve-se atentar para a presença de açúcar residual que pode estar presente no bagaço, e trás como consequências a diminuição da resistência do material além do atraso no tempo de pega (SARMIENTO e FREIRE, 1997). As características típicas dessas fibras estão relacionadas na Tabela 3.3. O bagaço de cana é a principal biomassa utilizada no país no processo de geração de energia.

Tabela 3.3 - Características típicas das fibras de bagaço de cana-de-açúcar (adaptado de SARMIENTO e FREIRE, 1997).

Massa específica aparente	300 a 400 kg/m <sup>3</sup>
Diâmetro	0,2 a 0,4 mm
Comprimento	26 a 300 mm
Resistência à tração	170 a 290 MPa
Módulo de elasticidade	15 a 19 GPa
Absorção de água	70 A 78,5%

### 3.2.4 Cogeração de energia

Segundo Coelho (1999), cogeração é a geração simultânea, a partir de uma mesma fonte primária de energia. A energia mecânica pode tanto ser utilizada na forma de



trabalho (como o acionamento das moendas nas usinas de açúcar e álcool) quanto transformada em energia elétrica.

A cogeração de eletricidade feita a partir da biomassa apresenta uma importante vantagem no que diz respeito aos benefícios ambientais, principalmente pelo balanço quase nulo das emissões de carbono, grande responsável pelo efeito estufa (MACEDO, I. C., 2008; COELHO e ZYLBERSZTAJN, 1998a; COELHO, 1999). Devido à utilização de resíduos agroindustriais, a bioeletricidade é considerada uma fonte de energia renovável, eficiente e sustentável (UNICA, 2010a). Segundo Coelho (1999), quando se considera o ciclo completo da biomassa, incluindo o consumo direto e indireto de fósseis, verifica-se a emissão de CO<sub>2</sub>, porém a taxas inferiores às obtidas pelas termelétricas movidas a combustíveis fósseis. A bioeletricidade sucroenergética é neutra em relação à emissão de gases de efeito estufa, embora esse aspecto ainda não seja devidamente valorizado nos leilões de energia (UNICA, 2010a).

De acordo com a ANEEL (2008), no Brasil a cana-de-açúcar se destaca como o recurso de maior potencial para geração de eletricidade dentro da biomassa. A produção brasileira de energia a partir da cana-de-açúcar e seus derivados, no ano de 2007, alcançou 37,8 milhões de toneladas equivalentes de petróleo (tep), representando um aumento de 14,7% em relação ao ano de 2006. As termoelétricas que utilizam biomassa de cana-de-açúcar estão ilustradas na Figura 3.13.

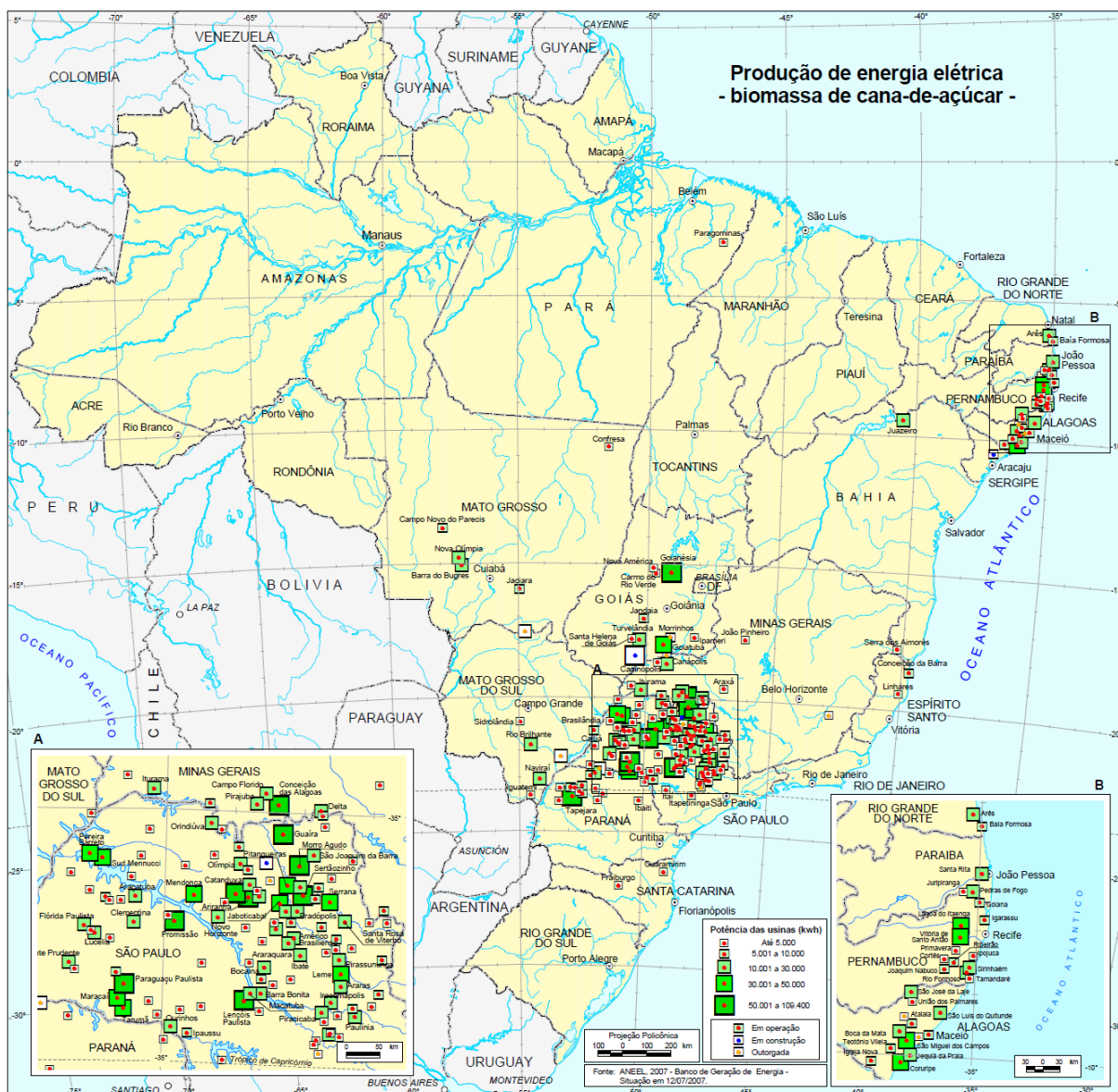


Figura 3.13 - Produção de energia elétrica – biomassa de cana-de-açúcar (IBGE, 2005).

O bagaço de cana-de-açúcar merece destaque na geração de energia elétrica, onde representou aproximadamente 180 milhões de toneladas na safra de 2009 (IBGE, 2010). Portanto, é um resíduo bastante atraente devido ao seu grande volume gerado no setor sucroalcooleiro e ao seu poder calorífico inferior (PCI) médio de 7,74 MJ/kg (1850 kcal/kg), com umidade de 50% (COELHO, 1999; PELLEGRINI, 2002; SOUZA, G. N. *et al.*, 2007a; LIMA, S. A. *et al.*, 2009).

Devido à alta produtividade do setor canavieiro e às novas tecnologias de transformação da biomassa sucroalcooleira, uma enorme quantidade de matéria

orgânica na forma de bagaço tem sido gerada, fornecendo combustível para a produção de energia térmica e elétrica, principalmente em sistemas de cogeração (Figura 3.14). A partir da cana-de-açúcar, o bagaço, a palha e o vinhoto podem ser beneficiados como matéria-prima para energéticos. Além da diversificação da matriz elétrica, outro importante aspecto é que a safra da cana-de-açúcar coincide com o período de estiagem das principais bacias elétricas do país, onde se encontram as principais hidrelétricas do país.



Figura 3.14 - Cane-de-açúcar: corte, moagem, produção e queima do bagaço. (a) Corte da cana-de-açúcar, (b) transporte até a unidade industrial, (c) a cana é lavada, (d) a cana é desfibrada e enviada à moenda para a retirada do caldo, (e, f) depósito do bagaço a céu aberto, (g) esteira rolante para levar o bagaço à caldeira, (h) caldeira onde é queimado o bagaço, (i) cinzas residuais (Adaptado de SOUZA, G. N. et al., 2007a).

Do ponto de vista técnico e institucional, o setor sucroalcooleiro é praticamente auto-suficiente em termos de suprimento energético, produzindo toda a eletricidade e todo o vapor necessários ao processo de produção (cerca de 500 kg/tc de vapor a 1,5 atm., 215°C, de 15-23 kWh/tc de energia elétrica e 10-15 kWh/tc de energia mecânica) (COELHO, 1999). O processamento de cada tonelada de cana necessita de aproximadamente 12 kWh de energia elétrica, que é obtido através de cogeração pelo próprio resíduo da cana-de-açúcar (palha, bagaço e vinhoto) (CORDEIRO, G. C., 2006).

Dentro do contexto de cogeração, a cadeia sucroalcooleira possui perspectiva de crescimento do potencial de geração de energia, apresentando atrativos econômicos e ambientais que fazem do Brasil um país com uma das matrizes energéticas mais limpas do mundo (LIMA, S. A. *et al.*, 2009; UNICA, 2010a). A bioeletricidade gerada nas usinas ainda é bastante reduzida, mas seu potencial de produção a partir do bagaço de cana é da ordem de 15% de toda demanda de eletricidade nacional, patamar que pode ser atingido até o ano de 2020 (LIMA, S. A. *et al.*, 2009; UNICA, 2010a).

Na safra de 2010/2011 serão geradas 780 MW de energia a partir da queima do bagaço de cana somente no estado de Minas Gerais. Deste volume, 18 usinas deverão vender 340 MW de energia excedente, valor quase suficiente para iluminar duas cidades como Uberaba, no Triângulo Mineiro. A meta para o ano de 2015 é de produzir 1.700 MW de energia excedente através do processo de cogeração. O Shopping Del Rey, localizado na cidade de Belo Horizonte/MG, aderiu à energia renovável, onde compra da Cemig a energia excedente produzida pela Usina Coruripe, localizada no Triângulo Mineiro, economizando 30% nos preços pagos (ESTADO DE MINAS, 2010).

Geralmente o bagaço possui em elevado valor de mercado, onde o preço da tonelada do bagaço *in natura* é o mesmo de uma tonelada de cana-de-açúcar (CORTEZ *et al.*, 1992; COELHO, 1999; PELLEGRINI, 2002). Como cada tonelada de cana moída gera cerca de 250 kg de bagaço úmido, este resíduo agrega à sua matéria-prima um valor comercial inicial proporcional a um quarto de seu custo. Por

outro lado, o conteúdo energético desta biomassa está em um grande volume de bagaço, o que aumenta o custo da coleta e transporte desse insumo (MACEDO, I. C., 2001).

Deve-se atentar para alguns dos problemas na utilização do bagaço de cana como combustível nas usinas: o bagaço possui uma baixa densidade energética (214.800 kcal/m<sup>3</sup>), com umidade de 50%, seu transporte tem um alto custo, é um material de difícil armazenamento e pode sofrer decomposição ao longo do tempo (CORTEZ *et al.*, 1992).



Figura 3.15 - Resíduo da cana: biomassa vegetal para produção de eletricidade e combustível (FAPESP, 2010a).

O bagaço de cana possui um excelente potencial energético equivalente a 49,5%, o vinhoto a 7,3% e o etanol a 43,2%. Porém, esse potencial não é utilizado nas usinas, uma vez que o bagaço é praticamente incinerado na produção de vapor de baixa pressão (em torno de 21 kgf/cm<sup>2</sup>), reduzindo sua potencialidade como insumo energético (CORTEZ *et al.*, 1992). Parte do vapor gerado, cerca de 63%, é utilizado em turbinas de contrapressão nos equipamentos de extração e o restante na geração de eletricidade (CORTEZ *et al.*, 1992).

Cada tonelada de cana-de-açúcar que alimenta a usina produz cerca de 25% de bagaço, com umidade de 50% (CORDEIRO, G. C., 2006; LIMA, C. C., 2006). No Brasil, cerca de 95% do bagaço de cana-de-açúcar gerados são queimados em caldeiras para a produção de vapor (PAULA *et al.*, 2008; MANSANEIRA, 2010). Já

segundo Macedo, I. C. (2001), cada tonelada de cana processada gera 140 kg de bagaço, dos quais 90% são utilizados para produzir energia elétrica e térmica nas usinas.

Através do processo de combustão do bagaço de cana, anualmente são geradas cerca de 4,0 milhões de toneladas de cinza (FIESP/CIESP, 2001). Devido ao imenso volume de resíduos gerados, confirma-se a importância de estudos da incorporação de cinzas ao concreto como adições minerais.

### **3.3 Adições minerais para o concreto**

#### **3.3.1 Generalidades**

Microconcretos são compósitos cimentícios para fins estruturais, os quais possuem em sua composição areia, cimento e água, sem a adição de agregados graúdos. Na confecção de compósitos cimentícios podem ser utilizadas adições e aditivos com o objetivo de conferir ao compósito propriedades especiais, tanto no estado fresco quanto no estado endurecido. Segundo Cimento Itambé (2009), as diferenças entre aditivos e adições são bastante sutis, no inglês são definidos como “chemical admixture” e “mineral admixture”, respectivamente. Os aditivos são acrescentados ao concreto em pequenas quantidades, no máximo 5% em relação à massa do cimento, enquanto que as adições podem até substituir grande parte do cimento. Ambos objetivam aprimorar o desempenho do concreto.

De acordo com Mehta e Monteiro (2008), as adições minerais são materiais silicosos finamente divididos, com propriedades pozolânicas, cimentícias ou de preenchimento de poros (*filler*), normalmente adicionados ao concreto em quantidades relativamente grandes, que variam de 20 a 70% por massa do material cimentício total. As adições podem ser somadas ao concreto ou substituir parcialmente o cimento, devido à semelhança de suas propriedades. Normalmente adiciona-se teor maior ou igual a 5% em relação ao peso do cimento (CIMENTO ITAMBÉ, 2009), o que pode acarretar significativamente na melhoria do

desempenho do concreto. Enfim, o teor de adições em cimentos é bem variado, dependendo das características e granulometria do material.

### **3.3.2 Efeito da adição em materiais cimentícios**

Entre os objetivos da utilização de adições e aditivos em concretos estão a melhora da trabalhabilidade, o aumento da plasticidade sem aumentar o consumo de água, a modificação do tempo de pega, a redução da exsudação e segregação, o aumento da resistência final e da impermeabilidade devido ao refinamento dos poros, a intensificação da resistência à ação do congelamento, a melhora da resistência à fissuração térmica devido ao baixo calor de hidratação, a resistência ao ataque por sulfato, a minimização da reação álcali-agregado e da corrosão das armaduras. A melhora destas propriedades reflete diretamente no aumento da durabilidade do material.

Como as adições são materiais extremamente finos, elas atuam como efeito *filler*, diminuindo o volume de vazios, conseqüentemente diminuindo a porosidade, reduzindo a permeabilidade e melhorando a resistência mecânica e a durabilidade, e conseqüentemente promovendo efeitos permanentes no material (MEHTA e MONTEIRO, 2008; MACEDO, P. C., 2009a). As adições minerais podem ser classificadas como sendo pozolânicas, cimentantes ou ambas, como mostra a Tabela 3.4.

Tabela 3.4 - Classificação, composição e características das adições minerais para concreto (adaptado de MEHTA e MONTEIRO, 2008).

Classificação	Composição química e mineralógica	Características da partícula
<b>Cimentantes e pozolânicas</b>		
Escória granulada de alto-forno (cimentante)	Na maior parte silicato vítreo contendo principalmente, cálcio, magnésio, alumínio, e sílica. Componentes cristalinos do grupo melilita podem estar presentes em pequenas quantidades.	O material não processado é da dimensão da areia e contém de 10 a 15% de umidade. Antes de ser usado, é seco e triturado em partículas menores de 45 µm (cerca de 500 m <sup>2</sup> /kg Blaine). As partículas têm textura áspera.
Cinzas volantes com alto teor de cálcio (cimentantes e pozolânicas)	Na maior parte silicato vítreo contendo principalmente cálcio, magnésio, alumínio e álcalis. A pequena quantidade de matéria cristalina presente geralmente consiste de quartzo e C <sub>3</sub> A; cal livre e periclásio podem estar presentes; CS e C <sub>4</sub> A <sub>3</sub> S podem estar presentes no caso de carvões com alto teor de enxofre. O carbono não queimado é menor do que 2%.	O pó corresponde a 10-15% de partículas maiores de 45 µm (normalmente 300-400 m <sup>2</sup> /kg Blaine). A maioria das partículas são esferas sólidas com diâmetro menor que 20 µm. A superfície da partícula normalmente é lisa, mas não tão limpa quanto as cinzas volantes com baixo teor de cálcio.
<b>Pozolanas altamente reativas</b>		
Sílica ativa condensada	Consiste essencialmente de sílica pura na forma não-cristalina.	Pó extremamente fino, consistindo em esferas sólidas de 0,1 µm de diâmetro médio (área superficial específica de cerca de 20 m <sup>2</sup> /g, por adsorção de nitrogênio).
Cinza de casca de arroz	Consiste essencialmente de sílica pura na forma não-cristalina.	As partículas normalmente são menores do que 45 µm, mas são altamente celulares (área superficial específica de 40 a 60 m <sup>2</sup> /g, por adsorção de nitrogênio).
<b>Pozolanas comuns</b>		
Cinza volante com baixo teor de cálcio	Na maior parte silicato vítreo contendo alumínio, ferro e álcalis. A pequena quantidade de matéria cristalina presente consiste geralmente de quartzo, mulita, silimanita, hematita, e magnetita.	O pó corresponde a 15-30% de partículas maiores do que 45 µm (normalmente 200 a 300 m <sup>2</sup> /kg Blaine). A maioria das partículas são esferas sólidas com diâmetro médio de 20 µm. Cenosferas e plerosferas podem estar presentes.
Materiais naturais	Além de vidro de aluminossilicato, as pozolanas naturais contêm quartzo, feldspato e mica.	As partículas são moídas a menos de 45 µm e têm textura áspera.
<b>Pozolanas pouco reativas</b>		
Escória de alto-forno resfriada lentamente, cinzas de forno, escória de caldeira, palha de arroz queimada em campo.	Consistem essencialmente de materiais de silicato cristalino e apenas uma quantidade pequena de matéria não-cristalina.	Os materiais devem ser pulverizados em partículas de dimensões muito finas para desenvolver alguma atividade pozolânica. As partículas moídas são de textura áspera.



### 3.3.3 Avaliação da atividade pozolânicas das adições

As adições podem apresentar sua composição física na forma cristalina ou amorfa, onde a fase ativa é composta basicamente por sílica. A norma NBR 12.653 (ABNT, 1992) define materiais pozolânicos como materiais silicosos ou silicoaluminosos que, por si sós, possuem pouca ou nenhuma atividade aglomerante, mas quando finamente divididos e na presença de água, reagem com o hidróxido de cálcio à temperatura ambiente para formar compostos com propriedades aglomerantes. O termo “atividade pozolânica” está, então, diretamente relacionado às reações entre a sílica, a cal e é geralmente avaliado em termos do consumo de hidróxido de cálcio liberado durante o processo de hidratação do cimento.

Para detectar se o material pode ser utilizado como adição mineral pozolânica, e assim substituir parcialmente o cimento Portland na confecção do concreto, é preciso verificar se o material possui reatividade em meio aquoso com o hidróxido de cálcio ( $\text{Ca(OH)}_2$ ), resultando em endurecimento (LIMA, S. A. *et al.*, 2009), formando compostos estáveis de poder aglomerante tais como os aluminatos e silicatos de cálcio hidratado (C-S-H) (CORDEIRO, G. C., 2006; PAULA, 2006). Além disso, para que haja a reação pozolânica, tanto a sílica quanto a alumina não podem ter elevado grau de cristalinidade (KAWABATA, 2008).

A disponibilidade de hidróxido de cálcio rege a função da sílica no processo de hidratação da pasta. À medida em que a quantidade de  $\text{Ca(OH)}_2$  vai diminuindo, a sílica deixa de reagir quimicamente de forma significativa como um aglomerante, passando a atuar como um inerte, através do efeito *filler*, contribuindo fisicamente. Isto ocorre devido ao empacotamento das partículas, onde os finos preenchem os vazios existentes entre as partículas maiores, reduzindo a porosidade e, conseqüentemente, aumentando a durabilidade dos concretos (TIBONI, 2007).

A sílica é um mineral bastante duro e está presente na natureza em diversas formas, encontrada na areia e na maioria das rochas. Quando cristalina, a sílica pode se encontrar na forma de quartzo, tridimita, cristobalita e trípoli; já em sua forma amorfa, a sílica se encontra como a sílica gel ou sílica coloidal. Uma vez que o tamanho da sílica é bem variável, entre  $0,01\mu\text{m}$  e  $1\mu\text{m}$ , pode-se considerar que ela

possui um diâmetro aproximado de 50 a 100 vezes menor que os diâmetros das partículas de cimento (MANSANEIRA, 2010).

As estruturas cristalina e amorfa do composto cerâmico dióxido de silício ( $\text{SiO}_2$ ) está ilustrada na Figura 3.16. Segundo Callister (2006), a diferença entre elas é que na fase amorfa a estrutura é desordenada e irregular. A estrutura se torna cristalina ou amorfa de acordo com a facilidade que sua estrutura atômica aleatória consegue se ordenar quando passa da fase líquida para a sólida. Outro ponto importante é que o resfriamento rápido a temperaturas inferiores à temperatura de congelamento favorece a formação da fase amorfa, devido ao pouco tempo disponível para a ordenação dos átomos.

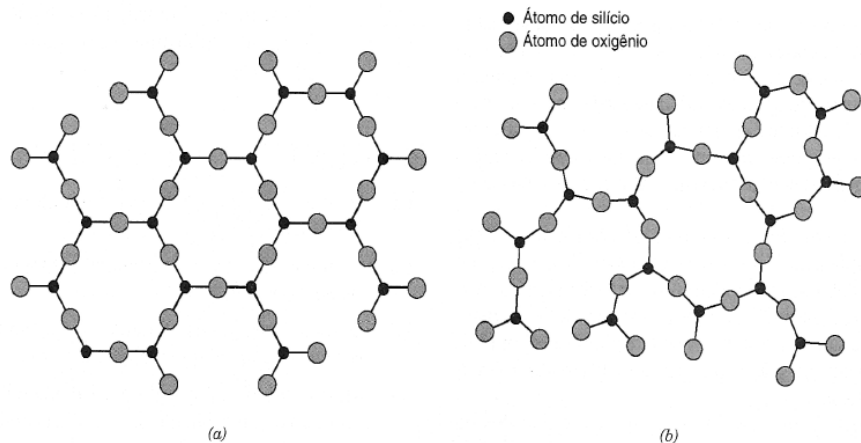


Figura 3.16 - Esquemas bidimensionais para a estrutura do (a) dióxido de silício cristalino e do (b) dióxido de silício não cristalino (CALLISTER, 2006).

A finura e a área específica da cinza são requisitos importantes no que diz respeito à sua pozolanicidade. A área superficial da cinza em contato com o meio aquoso é essencial na taxa de reação e precipitação de produtos hidratados, com o consequente aumento na velocidade de ganho de resistência mecânica. Por outro lado, as partículas de elevada área superficial tendem a se aglomerar ainda no estado seco, exigindo elevadas energias de misturas, diminuindo a eficiência do processo ou provocando a necessidade de aditivos que aumentam a dispersão. Já a finura influenciará diretamente a trabalhabilidade da pasta e a exsudação da água,

condições que afetam diretamente na facilidade de aplicação desse material (PAULA, 2006).

Segundo Freire e Beraldo (2003), existem na literatura recomendações de que a quase totalidade das partículas de pozolanas se encontrem abaixo da peneira de abertura de malha de 0,035 mm, ou com um Blaine superior a 300 m<sup>2</sup>/Kg. Outros autores consideram que somente partículas abaixo de 15 µm possuem atividade pozolânica (ISAIA, 1995), devido a uma série de fatores, dentre eles:

- I. A área de superfície específica (m<sup>2</sup>/g) cresce na razão inversa da diminuição do diâmetro ou a superfície específica varia em função do quadrado da variação do diâmetro;
- II. Partículas menores resfriam-se mais rapidamente, apresentando então maiores teores de vidro;
- III. No caso de pozolanas obtidas através da calcinação de vegetais, onde a sílica originalmente é amorfa, a elevação da temperatura próxima a pontos de fusão proporciona a aglomeração das partículas e a recristalização da sílica.

A classificação dos materiais pozolânicos, segundo a norma NBR 12.653 (ABNT, 1992), é dividida em três classes: (N) pozolanas naturais e artificiais (argilas calcinadas); (C) cinzas volantes e materiais resultantes da queima do carvão em usinas termoelétricas; (E) qualquer pozolana que não se enquadre nas classes N e C. Esta norma não explicita a classificação de pozolanas altamente reativas, como a sílica ativa, metacaulim e a cinza de casca de arroz, e como pode ser o caso da cinza do bagaço de cana-de-açúcar.

#### **3.3.4 Diretrizes da utilização de adições minerais**

O controle de qualidade das adições minerais é extremamente importante, pois variações nas suas propriedades físicas e/ou químicas podem afetar diretamente as propriedades finais das argamassas e concretos. Daí a importância da avaliação da

uniformidade e compatibilidade dessas adições com os outros componentes do concreto.

Segundo Rodrigues, C. S. (2004), as adições minerais podem ser empregadas em cimentos de duas formas: moídas juntamente com o clínquer ou adicionadas ao cimento Portland durante a confecção do concreto. No que diz respeito ao emprego de uma determinada adição mineral em materiais cimentícios, deve-se considerar três fatores principais (RODRIGUES, C. S., 2004):

- I. Quantidade de carbono: o carbono não participa das reações de hidratação da pasta. Quando em excesso, o carbono interfere na ação de alguns aditivos (como agentes incorporadores de ar), além de conferir cor escura ao material. O carbono pode comprometer o comportamento mecânico do material, além de interferir no consumo de água de amassamento.
- II. Capacidade de promover melhor trabalhabilidade: as adições minerais podem melhorar a trabalhabilidade das argamassas e concretos através da dispersão e defloculação das partículas de cimento.
- III. Atividade pozolânica: algumas propriedades do concreto em idades avançadas, como a resistência e a permeabilidade, dependem diretamente da atividade pozolânica, embora a resistência mecânica aos 28 dias esteja mais relacionada com o fator água/cimento.

### **3.3.5 Tipos de adições minerais**

Alguns materiais já são utilizados como adições minerais em conjunto com o cimento Portland, dentre os quais se destacam a sílica ativa, cinza volante, *filler* calcário, escória granulada de alto-forno, metacaulim e cinza da casca de arroz, dando ao conjunto o nome de “cimento composto” (YU *et al.*, 1999; FENG *et al.*, 2004a; FENG *et al.*, 2004b; AKASAKI *et al.*, 2005; TASHIMA, 2006; CORDEIRO, G. C., 2006; CASTRO, A. L., 2007; SOUZA, J. *et al.*, 2007b; ZUCCO, 2007; ZUCCO e BERARDO, 2008; RODRIGUES, M. S., 2008; LASKAR e TALUKDAR, 2008; NIEBEL *et al.*, 2009; CORDEIRO, G. C., 2009). Ao incorporar um resíduo à matriz

de cimento na forma de adição mineral, alteram-se as características dos aglomerantes, mas ao mesmo tempo pode-se preservar e até melhorar as características de desempenho desse produto (PAULA, 2006).

As usinas termoelétricas e alto-fornos metalúrgicos são as principais fontes de subprodutos utilizados como adição mineral, como a cinza volante, a sílica ativa, a escória de alto-forno e a cinza de casca de arroz (YU *et al.*, 1999; TASHIMA, 2006; CORDEIRO, G. C., 2006; ZUCCO, 2007; SOUZA, J. *et al.*, 2007b; MEHTA e MONTEIRO, 2008; RODRIGUES, M. S., 2008; ZUCCO e BERALDO, 2008). O reaproveitamento desses resíduos é uma necessidade devido ao alto custo ambiental embutido no descarte inadequado na natureza (ZUCCO e BERALDO, 2008). A utilização de resíduos agroindustriais, gerados por outros setores da economia, na construção civil, além de lhes proporcionar um destino nobre, contribuindo com a despoluição do ambiente, também lhes agrega valor, economiza matérias-primas não renováveis e alavanca a atividade industrial, gerando milhões de empregos na agroindústria (PAULA *et al.*, 2008; SOUSA *et al.*, 2009).

### **3.3.6 Importância do uso das adições na sustentabilidade**

A modificação do meio ambiente, por meio da atividade humana, gera impactos nem sempre previsíveis. O homem, como integrante do ecossistema, tem a qualidade de vida afetada pela própria ação. Sendo assim, se faz necessário uma política de desenvolvimento sustentável, tanto para a melhoria da qualidade de vida quanto para a própria sobrevivência da raça humana (VASCONCELLOS *et al.*, 2004). A busca pelo desenvolvimento de projetos voltados ao uso racional dos recursos naturais e para a recuperação do meio ambiente se mostram extremamente importante neste contexto (PAULA, 2006).

A indústria da Construção Civil é uma das que mais consomem recursos naturais, tais como pedras britadas ou ornamentais, areias, água, argilas, madeira e grandes movimentações de diferentes tipos de solo. Os materiais de construção vêm sendo avaliados tanto por suas propriedades e desempenho ao longo de sua vida útil, quanto pelo processo de produção e pelo consumo de matérias-primas (FREITAS,

2005). Os impactos ambientais gerados pela extração desses materiais geram grandes problemas ambientais, quase sempre de forma irreversível (VASCONCELLOS *et al.*, 2004).

O cimento Portland é, depois da água, o produto mais utilizado em todo o mundo (DUXSON e PROVIS, 2008). Cerca de 1,7 bilhões de toneladas deste material são fabricadas por ano em todo o mundo, suficiente para produzir 6 km<sup>3</sup> de concreto por ano (GARTNER, 2004). Estima-se que esse valor vai superar a casa de 3 bilhões de toneladas/ano em 2020 (KAWABATA, 2008).

O processo de produção do cimento Portland, principal constituinte do concreto, é responsável pela emissão de vários gases intensificadores do efeito estufa. Em menor escala podemos citar o monóxido de carbono (CO), metano (CH<sub>4</sub>), óxido de nitrogênio (NO<sub>x</sub>), dióxido de nitrogênio (NO<sub>2</sub>) e dióxido de enxofre (SO<sub>2</sub>), sendo o principal o dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>), correspondente a 0,632 toneladas de CO<sub>2</sub> lançada na atmosfera por cada tonelada de clínquer produzido (SOUZA, G. N. *et al.*, 2007a). Já o Mehta (2002) diz que a relação da emissão de CO<sub>2</sub> e da produção de clínquer é de 1:1 em toneladas. Kawabata (2008) relata que cada tonelada de cimento produzida libera na atmosfera mais de uma tonelada de CO<sub>2</sub>. Independente do valor exato, é unanimidade que o valor de dióxido de carbono emitido para a atmosfera é imenso. Segundo Malhotra (2002), cerca de 7% de todo CO<sub>2</sub>, equivalente a 1,4 bilhões de toneladas por ano, que é emitido em todo o mundo se deve à produção de cimento Portland. O lançamento desses gases na atmosfera produz aumento da temperatura, gerando impactos regionais e locais de mudança no clima, e suas respectivas consequências, como tempestades, inundações, doenças relacionadas ao sistemas respiratórios e inflamações, dentre outras (UNICA, 2010a).

Na indústria do cimento, 90% da emissão de carbono se processam nos fornos que queimam o clínquer (NUNES *et al.*, 2008). Este processo de fabricação libera o CO<sub>2</sub> através da calcinação do calcário e queima de combustíveis fósseis (CORDEIRO, G. C., 2006). O grande desafio das indústrias cimenteiras é diminuir a emissão desses gases, reduzindo assim o impacto que esses gases trazem ao meio ambiente. Três

países concentram cerca de 36% da produção mundial de clínquer: Brasil, China e Índia (MALHOTRA, 1999).

Visando mitigar os danos causados pela produção do clínquer e minimizar a utilização do cimento Portland, cientistas estão sempre à procura de resíduos de materiais que podem ser utilizados junto ao cimento na confecção de argamassas e concretos (SINGH *et al.*, 2000). Podemos verificar este fato nos vários trabalhos desenvolvidos para testar a viabilidade da substituição parcial do clínquer por resíduos industriais ou agroindustriais que funcionam como materiais cimentícios e/ou pozolânicos no concreto (FENG, 2004b; CORDEIRO, G. C., 2006; PAULA, 2006; TIBONI, 2007; RODRIGUES, M. S., 2008; LIMA, S. A., 2009; MACEDO, P. C., 2009a; MANSANEIRA, 2010).

Segundo Sales *et al.* (2010), qualquer cinza, seja de origem vegetal ou industrial, tendo em sua composição a predominância do silício, principalmente quando no estado amorfo, e granulometria refinada, pode ser utilizada como adição mineral. Portanto, a cinza de bagaço de cana-de-açúcar se mostra potencialmente apta para essa função.

### **3.4 Cinza de bagaço de cana e sua potencialidade como aditivo mineral**

#### **3.4.1 Produção de cinza de bagaço de cana-de-açúcar**

Após o processo de combustão da cana-de-açúcar, cerca de 0,7% de sua massa (CORDEIRO, G. C., 2006) permanece sob a forma de cinza residual, o equivalente a 4,8 milhões de toneladas somente no ano de 2009. Porém, segundo FIESP/CIESP (2001), considerando que somente 93% do bagaço de cana são utilizados como combustíveis nas caldeiras, a quantidade de cinza residual seria de aproximadamente 0,58% da massa total da cana-de-açúcar, o que totaliza um rendimento próximo a 4,0 milhões de toneladas de cinza (FIESP/CIESP, 2001).

Acredita-se que o percentual de cinzas residuais geradas na queima do bagaço será variável em função da eficiência do processo de queima das caldeiras.

A aplicação do bagaço de cana-de-açúcar como fonte de cinza obedece principalmente a dois fatores: o rendimento da cinza e a sua constituição química (PAULA, 2006), a qual varia de acordo com as condições de queima e características do bagaço (CORDEIRO, G. C., 2006; LIMA, S. A. *et al.*, 2009). O bagaço nas usinas de açúcar e álcool é queimado em caldeiras através do sistema denominado cogeração, que consiste na produção de vapor fornecido às turbinas de acionamento mecânico (bombas, moendas, desfibriladores) e para a produção de energia elétrica (MACEDO, P. C. *et al.*, 2009b). O resíduo gerado neste processo é a cinza do bagaço de cana-de-açúcar, de acordo com o fluxograma da Figura 3.17.

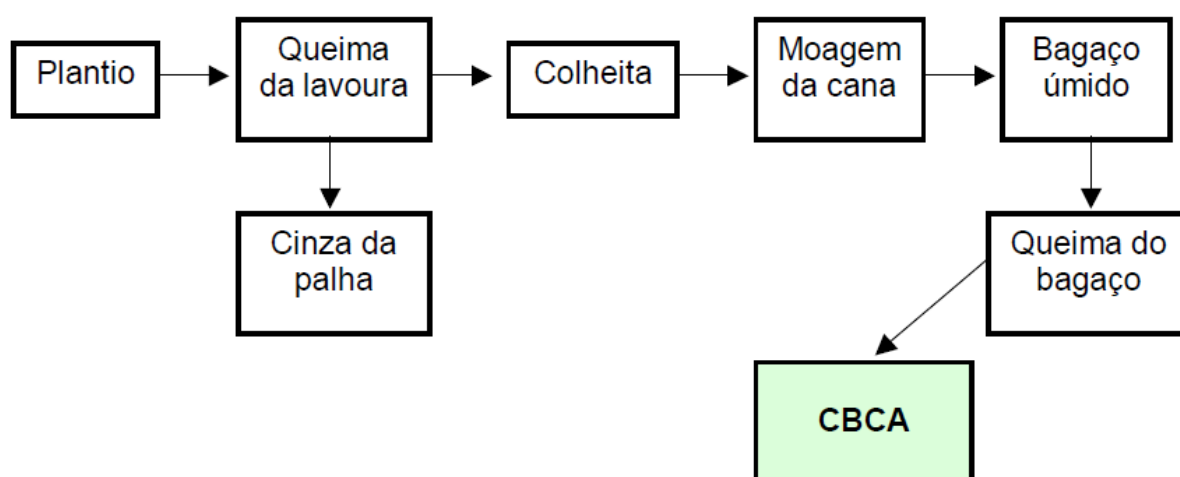


Figura 3.17 - Fluxograma simplificado da produção de cinza de bagaço de cana-de-açúcar (CBCA) (FREITAS, 2005).

### 3.4.2 Aspectos da cinza relacionados ao meio ambiente

Uma vez que o volume de cinza de bagaço de cana-de-açúcar gerado é muito grande, equivalendo a cerca de 6% da tonagem de cimento produzido no Brasil (FAIRBAIRN *et al.*, 2010), lançá-la em córregos ou aterros sanitários provoca sérios problemas ambientais, além de desperdiçar uma matéria-prima de qualidade. Utilizar esses materiais como agregado para o concreto ou como base em estradas pode



minimizar o impacto ambiental, mas não aproveita o potencial cimentante e pozolânico desses materiais. Portanto, como esses subprodutos possuem um adequado controle de qualidade, eles podem ser incorporados ao concreto na forma de cimento Portland composto ou como adição mineral, substituindo parte do cimento pelo produto pozolânico, conseqüentemente se obtendo uma economia considerável de energia e de custo.

Pesquisas recentes estudam o uso da cinza do bagaço de cana na confecção do concreto (VALENCIANO e FREIRE, 2004; CORDEIRO, G. C. *et al.*, 2006; SOUZA G. N. *et al.*, 2007a; LIMA, S. A. *et al.*, 2009, MARTINS e ZANELLA, 2009). A incorporação destes resíduos ao cimento poderá possibilitar a redução da quantidade de clínquer por m<sup>3</sup> de concreto / argamassa, reduzindo sensivelmente a extração de matérias-primas nobres, a emissão de CO<sub>2</sub> na atmosfera (FAIRBAIRN, *et al.*, 2010) e, conseqüentemente, os impactos ambientais gerados pela indústria cimenteira.

Um estudo realizado por Figueiredo *et al.* (2010), conclui que cada tonelada de açúcar produzido libera 241 kg de dióxido de carbono à atmosfera (2.406 kg de CO<sub>2</sub> equivalente por hectare de área colhida e 26,5 kg de CO<sub>2</sub> equivalente por cada tonelada de cana-de-açúcar processada). A maior parte da emissão gerada se deve às queimadas dos resíduos (44%), 20% advém do uso de fertilizantes sintéticos e cerca de 18% da combustão de combustíveis fósseis. Porém, segundo Macedo, I. C. e Carvalho (2005), a produção agrícola da cana-de-açúcar no Brasil apresenta baixos impactos ambientais, uma vez que: utiliza baixo nível de defensivos; tem um importante programa de controle biológico de pragas; tem o menor índice de erosão do solo da agricultura brasileira; recicla todos os seus resíduos; não compromete a qualidade dos recursos hídricos; participa ativamente de inovações (apresentando a maior área de produção orgânica do país).

A geração de energia termelétrica a partir da biomassa (em substituição ao óleo combustível, carvão, dentre outros combustíveis fósseis) reduz consideravelmente a emissão de poluentes na natureza, principalmente devido à ausência de enxofre (COELHO *et al.*, 1997). A partir da cogeração, o balanço das emissões de CO<sub>2</sub> é considerado praticamente nulo, pois a contribuição de CO<sub>2</sub> emitida durante a queima

no processo de geração de energia nas usinas é compensada pela quantidade de CO<sub>2</sub> que é adsorvido durante o processo de crescimento das plantas (fotossíntese) (BORGES e ARBEX, 1994; COELHO *et al.*, 1998b; PELLEGRINI, 2002). Mesmo quando o consumo direto e indireto é considerado no ciclo da biomassa, o volume gerado de CO<sub>2</sub> é consideravelmente menor que as emissões geradas por termelétricas à base de combustíveis fósseis (COELHO *et al.*, 1998b; PELLEGRINI, 2002). De uma forma geral, pode-se dizer que a agroindústria canavieira contribui na diminuição de emissão de CO<sub>2</sub> na atmosfera, tanto por utilizar o álcool anidro e hidratado ao invés da gasolina quanto por substituir o óleo combustível pelo bagaço da cana-de-açúcar (BORGES e ARBEX, 1994).

Um dos principais problemas ambientais gerados por uma usina termelétrica é derivado da produção de toneladas de cinzas residuais no processo de cogeração. As cinzas, então, eram dispostas de forma inadequada na natureza, sem qualquer medida de proteção. A lixiviação desse material pode possibilitar a contaminação de lençóis freáticos por metais pesados e íons sulfato (VASCONCELLOS *et al.*, 2004).

No setor elétrico brasileiro, a bioeletricidade gerada a partir do bagaço de cana nas usinas de produção de álcool e açúcar coincide justamente com o período seco da geração hidrelétrica, o que pode melhorar o déficit de energia, que já é um problema real no país (COELHO *et al.*, 1997; COELHO *et al.*, 1998b; COELHO, 1999; PELLEGRINI, 2002; UNICA, 2010a). Além disso, a localização da maior parte das usinas de cana-de-açúcar se encontra na área de maior consumo de energia do país, reforçando a viabilidade de investimentos no processo de cogeração de energia a partir da biomassa.

Diante do panorama de crescimento do setor sucroalcooleiro, aliado ao desejo de promover o desenvolvimento sustentável, vários estudos têm sido feitos com o objetivo de aproveitar a cinza de bagaço de cana-de-açúcar na construção civil (MACEDO, P. C. *et al.*, 2009a). Grande parte desse resíduo industrial gerado pode ser reutilizado, reciclado, incorporado e transformado, proporcionando alternativas sustentáveis, economicamente viáveis, com desempenho suficiente ao longo da vida útil e com relação custo-benefício favoráveis para a inovação da tecnologia de materiais de construção, como o caso do concreto (GANESAN *et al.*, 2007a;

COUTINHO, 2007). Esse procedimento gera uma série de benefícios no que diz respeito a minimizar o impacto ambiental, principalmente porque diminui as emissões de CO<sub>2</sub> na atmosfera, diminui o volume de resíduos destinados a aterros sanitários e leitos de rios e córregos, ajuda a preservar recursos naturais não renováveis e reduz o custo de produção do concreto, melhorando suas propriedades mecânicas e sua durabilidade.

### 3.4.3 Características das cinzas

Segundo Cordeiro, G. C. (2006), quanto maior a temperatura no interior do salão da caldeira (600°C a 800°C) e maior o tempo de exposição ao calor, maior será a quantidade de carbono liberada, produzindo diferentes colorações de cinzas. A cor é indicativa do grau de calcinação a que o bagaço foi submetido e, conseqüentemente, ao seu teor de carbono (Figura 3.18). O carbono confere uma microporosidade e irregularidade na cinza, responsáveis pelos altos valores de área de superfície específica. Além disso, o processo não controlado de incineração do bagaço da cana-de-açúcar produz cinzas com altos teores de matéria orgânica e carbono (PAULA, 2006).



Figura 3.18 - Bagaço de cana-de-açúcar (a) e diferentes cinzas residuais geradas após a queima do bagaço em caldeira: cinza escura com alto teor de carbono, característico de combustão incompleta (b), cinza com menor teor de carbono (c) e cinza gerada após combustão completa (d) (CORDEIRO, G. C., 2006).

Apesar do elevado teor de umidade, o bagaço possui uma boa ignição devido à presença do alto teor de materiais voláteis (da ordem de 87% em base seca), que representam 78% do poder calorífico e consomem aproximadamente 74% do ar de combustão (PELLEGRINI, 2002). A umidade presente no bagaço que alimenta as caldeiras interfere diretamente no rendimento da combustão e nas características da cinza gerada (LIMA, S. A. *et al.*, 2009).

A temperatura de ignição do bagaço varia entre 500°C e 600°C para um teor de umidade de 50%, com a temperatura da chama entre 850°C e 920°C. Para o teor de umidade entre 35% e 40%, a temperatura de ignição fica entre 300°C e 400°C, sendo que a temperatura da chama pode chegar a valores superiores a 1000°C (COELHO, 1999; PELLEGRINI, 2002; SOUZA, G. N. *et al.*, 2007a; LIMA, S. A. *et al.*, 2009). Os processos de secagem do bagaço, utilizando temperaturas de até 300°C, podem obter valores de umidade de até 12,4% (CORTEZ *et al.*, 1992).

A temperatura de queima do bagaço de cana-de-açúcar vai determinar o surgimento das diferentes fases da sílica (amorfas ou cristalinas), onde a presença de material cristalino nas cinzas é devida às altas temperaturas de combustão nas caldeiras (MARTINERA HERNÁNDEZ *et al.*, 2000; NEHDI *et al.*, 2003). Segundo Paula (2006), além da temperatura, o período de queima também influencia a forma e a quantidade da sílica.

Para que o conteúdo de sílica se transforme em fase amorfa, a cinza deve ser queimada a temperaturas abaixo de 700°C, durante uma hora (MACEDO, P. C. *et al.*, 2009b). Contudo, Martinera Hernández *et al.* (2000) afirmam que a temperatura de combustão dos resíduos agrícolas deve oscilar entre 400°C e 800°C de modo a evitar a formação de fases cristalinas da sílica (produto proveniente das altas temperaturas de combustão), sendo que abaixo de 600°C encontra-se elevado o percentual de sílica amorfa. Segundo Payá *et al.* (2002), as cinzas de bagaço com temperaturas de queima acima de 800°C apresentaram elevada cristalinidade, com picos de quartzo e mulita. Cordeiro, G. C. *et al.* (2009c) identificaram que a temperatura de 600°C é a mais apropriada para produzir uma cinza de bagaço de cana predominantemente pozolânica. A Tabela 3.5 mostra a influência das

temperaturas de queima do bagaço da cana-de-açúcar na constituição amorfa ou cristalina da cinza, de acordo com Paula (2006).

Tabela 3.5 - Influência das temperaturas de queima do bagaço de cana-de-açúcar nas propriedades da cinza gerada (adaptado de PAULA, 2006).

<b>Temperatura de queima do bagaço de cana-de-açúcar (T)</b>	<b>Modificações ocorridas durante o processo de queima do bagaço</b>
< 100°	A perda de massa do material é consequência da evaporação da água absorvida.
± 350°	A queima do bagaço de cana-de-açúcar se inicia através da ignição do material mais volátil.
400° < T < 500°	Maior perda de massa, onde o carbono residual é oxidado. A cinza torna-se rica em sílica amorfa.
> 700°	Pode levar à formação de quartzo ou de outras formas cristalinas.
> 800°	A sílica presente na cinza do bagaço de cana é essencialmente cristalina.

Embora não tenha um consenso sobre a temperatura e o tempo ideal de queima do bagaço para se obter um material amorfo, os estudos mostram a importância do controle de queima das cinzas para otimizar a sua reatividade (MARTINERA HERNÁNDEZ *et al.*, 2000; NEHDI *et al.*, 2003).

A cinza do bagaço da cana-de-açúcar apresenta um alto teor de silício, normalmente acima de 60% (em massa) e, conseqüentemente, apresenta atividade pozolânica (MARTINERA HERNÁNDEZ, 2000; CORDEIRO, G. C. *et al.*, 2004; CORDEIRO, G. C., 2006). O silício é absorvido do solo pelas raízes da cana-de-açúcar na forma de ácido monossilícico (H<sub>4</sub>SiO<sub>4</sub>) e, após a saída da água das plantas pelo processo de transpiração, deposita-se na parede externa das células da epiderme como sílica gel (CORDEIRO, G. C., 2006). A Tabela 3.6 indica diversos teores de SiO<sub>2</sub> da cinza do bagaço de cana-de-açúcar encontrado em diferentes pesquisas (MACEDO, P. C. *et al.*, 2009b). As características mineralógicas é o que difere essas cinzas, ou seja, é a forma em que a sílica é encontrada: amorfa ou cristalina.

Tabela 3.6 - Teor de sílica da cinza do bagaço de cana-de-açúcar, segundo diversos autores (adaptado de MACEDO, P. C. *et al.*, 2009).

<b>Autor</b>	<b>Ano</b>	<b>Local de Coleta</b>	<b>País</b>	<b>Teor de SiO<sub>2</sub> (%)</b>
Baguant	1995	Port Louis	Is. Maurício	73,10
Martirena-Hernández <i>et al.</i>	1998	Villa Clara	Cuba	72,74
Singh; Singh; Rai	2000	Captainganj, District Kushinagar	Índia	63,16
Payá <i>et al.</i>	2002	Valle del Cauca	Colômbia	59,87
Zardo <i>et al.</i>	2004	Araras, SP	Brasil	77,30
Freitas	2005	Campos dos Goytacazes, RJ	Brasil	65,70
Paula	2006	Uracânia, MG	Brasil	83,71
Cordeiro	2006	São João da Barra, RJ	Brasil	78,34
Borlini <i>et al.</i>	2006	Campos dos Goytacazes, RJ	Brasil	77,50
Mu' Azu	2007	Não mencionado	Nigéria	57,95
Ganesan; Rajagopal;	2007	Aranthangi, ThamilNadu	Índia	64,15
Santos; Formagini	2008	Sidrolândia, MS	Brasil	83,80

A areia (quartzo), oriunda da lavoura, pode contribuir com a presença de sílica na composição da cinza, quando não é removida totalmente através do processo de lavagem da cana-de-açúcar. Esta areia é facilmente identificada nas operações de limpeza das caldeiras, onde ocorre a combustão. O quartzo representa a fase cristalina que torna o material menos reativo e, por consequência, com baixa atividade pozolânica (FREITAS, 2005). A Figura 3.19 ilustra a morfologia da cinza do bagaço de cana-de-açúcar, onde apresenta uma estrutura celular bastante porosa e contaminada com a presença de quartzo.

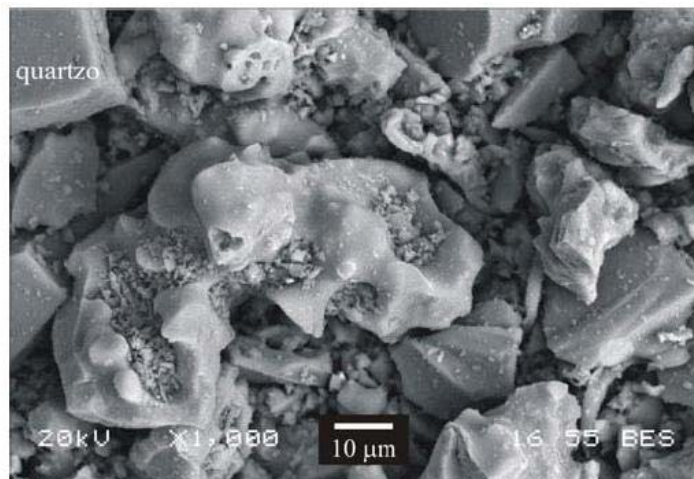


Figura 3.19 - Morfologia das partículas da cinza do bagaço de cana-de-açúcar (CORDEIRO, G. C., 2006). A presença de partículas de quartzo também pode ser observada. (Imagem obtida por microscopia eletrônica de varredura com detecção por elétrons retroespalhados – aumento de 1000 vezes).

A granulometria dos aditivos minerais desempenha um importante papel com relação à sua reatividade química. Uma vez que a reação pozolânica ocorre com um dos componentes em estado sólido (pozolana), aumenta-se a taxa de reação satisfatoriamente através do processo de moagem da cinza, aumentando a superfície de contato com o hidróxido de cálcio. A reatividade entre a sílica presente nas cinzas e os produtos de hidratação do cimento pode proporcionar melhorias nas propriedades mecânicas e físicas das argamassas e concretos (PAULA, 2006). Segundo Mehta e Monteiro (2008), os mecanismos pelos quais os aditivos minerais influenciam as propriedades de concretos, argamassas e pastas são mais dependentes do tamanho, forma e textura das partículas do que de sua composição química. Segundo a norma NBR 12.653 (ABNT, 1992), existem alguns critérios para classificar o resíduo como um material pozolânico, sendo eles: 50 ou 70% da composição com a soma dos teores de  $\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{FeO}_3$ , teor máximo de 4 ou 5% de  $\text{SO}_3$ , teor máximo de 1,5% de  $\text{Na}_2\text{O}$  e perda ao fogo de 6 ou 10%. O índice de atividade pozolânica da cinza com o cimento deve ser de pelo menos 75% da resistência à compressão do traço de referência (sem adição de cinza) aos 28 dias e de pelo menos 6,0 MPa para a atividade pozolânica com a cal.

Segundo Neville (1997), teores elevados de sódio (Na) e potássio (K) podem favorecer o aparecimento de eflorescências ou a ocorrência da reação álcali-agregado. Além disso, o teor de anidrido sulfúrico ( $\text{SO}_3$ ) deve ser menor ou igual a 5% para evitar a expansão pela formação de maior quantidade de etringita (NEVILLE, 1997).

A cominuição consiste na fragmentação de uma estrutura sólida quando submetida a esforços mecânicos, aplicados por elemento que provocam deformação das partículas (Figura 3.20) (CORDEIRO, G. C., 2006).

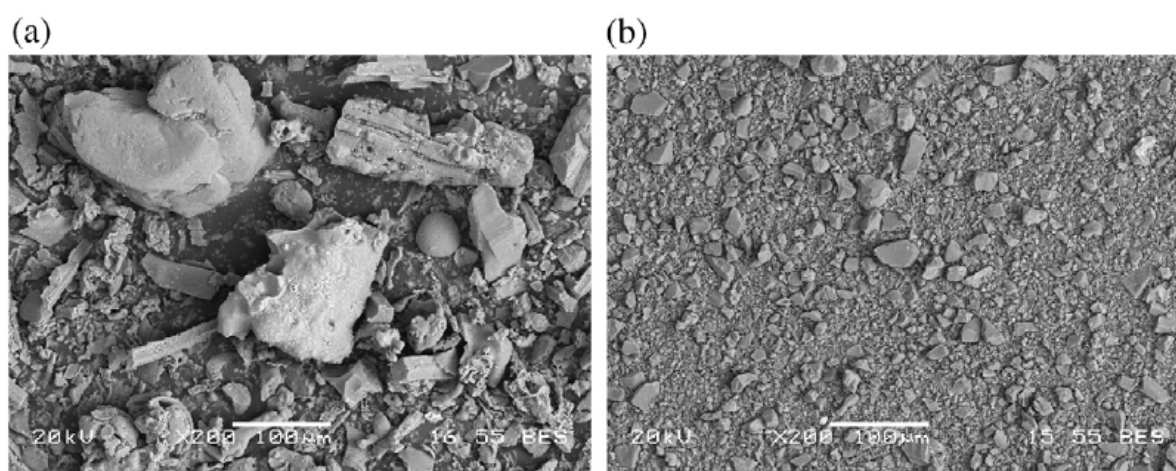


Figura 3.20 - Imagens por Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) da cinza do bagaço de cana-de-açúcar depois de 8 minutos (a) e 240 minutos (b) em moagem vibratória (CORDEIRO, G. C., 2009b).

Segundo Cordeiro, G. C. (2006), o processo de cominuição de materiais cimentícios e aditivos minerais, mesmo sendo uma operação dispendiosa, é extremamente necessário para ativar as reações químicas, cujas taxas são diretamente proporcionais à superfície específica do material que, por sua vez, é inversamente proporcional ao tamanho das partículas. O aumento desta superfície específica está diretamente relacionado à cinética das reações pozolânicas (CORDEIRO, G. C. *et al.*, 2009b). Outra vantagem deste processo é que a redução das partículas pode proporcionar maior compacidade à mistura.



Pouey e Dal Molin (2010) avaliaram que a influência do tamanho das partículas de casca de arroz é inversamente proporcional ao índice de atividade pozolânica (IAP) na pasta de cimento, onde as cinzas mais cristalinas necessitam de uma maior redução na sua granulometria para obterem um comportamento equivalente às cinzas menos cristalinas ou predominantemente mais amorfas.

O processo de moagem é aplicado quando se deseja obter produtos com tamanhos de partículas muito reduzidos. Este processo consiste na combinação dos efeitos de compressão, impacto e abrasão realizados em moinhos compostos com corpos moedores.

A atividade pozolânica é evidenciada através de um material pela sua resistência combinada com sua durabilidade. Recomenda-se fazer ensaios mecânicos sempre que possível para avaliar estas propriedades, mesmo que as pozolanas não passem com êxito pelos ensaios de pozolanicidade (MARTINERA HERNÁNDEZ *et al.*, 2000). As altas temperaturas das caldeiras, a combustão incompleta do bagaço, a presença de substâncias cristalinas e impurezas (como o carbono) influenciam negativamente na reatividade da cinza (MARTINERA HERNÁNDEZ *et al.*, 2000).

Para adições minerais, o processo de perda ao fogo é atribuído à quantidade de matéria orgânica (carbono livre) presente no material, uma vez que a umidade e os materiais voláteis foram eliminados no processo de queima. A quantidade de carbono presente na cinza, utilizada como adição mineral na confecção de argamassas ou concretos, influencia as propriedades mecânicas desses materiais cimentícios. Valores de até 20% de carbono na cinza não afetam significativamente a resistência à compressão, o que já não é verdadeiro para valores superiores a 30%, onde a queda de resistência é consequência da diminuição na quantidade de sílica (PAULA, 2006).

Neste contexto, o uso ambientalmente correto das cinzas de bagaço de cana se dá de forma que a produção de energia em termoelétrica de bagaço possa ser considerada um processo sustentável na sua totalidade. A utilização destas cinzas reduzirá um passivo ambiental da agroindústria sucroalcooleira, fechando o ciclo de CO<sub>2</sub> zero da cogeração em termoelétrica de bagaço de cana-de-açúcar e ainda contribuirá diretamente para a diminuição da emissão de poluentes.

Pesquisas recentes mostram que a cinza do bagaço de cana-de-açúcar apresenta adequada atividade pozolânica para ser utilizada como adição mineral no concreto, principalmente quando possui uma granulometria refinada (MARTINERA HERNÁNDEZ *et al.*, 1998; CORDEIRO, G. C., 2006; SOUZA, G. N. *et al.*, 2007a; SOUSA *et al.*, 2009).

#### **3.4.4 Estudos sobre a cinza do bagaço de cana-de-açúcar**

Estudos mostram a semelhança entre a composição química da cinza do bagaço de cana-de-açúcar e a cinza da casca de arroz, esta já reconhecida na literatura como uma pozolana ativa (REAL *et al.*, 1996; YU *et al.*, 1999; FENG *et al.*, 2004b; TASHIMA, 2006; CORDEIRO, G. C., 2006; ZUCCO, 2007; MEHTA e MONTEIRO, 2008; RODRIGUES, M. S., 2008; CORDEIRO, L. N. P., 2009). A Tabela 3.7 analisa algumas referências sobre a caracterização destas duas cinzas. As condições de queima adotadas por estes trabalhos não foram referenciadas, porém podemos destacar que os valores reduzidos da perda ao fogo indicam cinzas produzidas em processos de combustão praticamente completos, exceto a avaliada por Singh *et al.*, 2000. A variação entre a composição química destes materiais se deve à provável presença de carbono residual e óxidos contaminantes (CORDEIRO, G. C., 2006).

Tabela 3.7 - Composição química determinada por fluorescência de raios X de cinzas da casca de arroz e do bagaço de cana-de-açúcar (CORDEIRO, G. C., 2006).

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

Alguns trabalhos citam o emprego da cinza residual do bagaço como aditivo mineral, afirmando a sua potencialidade de melhoria das características físicas e mecânicas do concreto (VALENCIANO e FREIRE, 2004; CORDEIRO, G. C. *et al.*, 2006; SOUZA, G. N. *et al.*, 2007a; GANESAN *et al.*, 2007b; SOUSA *et al.*, 2010).

Outros estudos mostram que alguns tipos de cinzas podem ser utilizadas em substituição ao agregado miúdo (LIMA, S. A. *et al.*, 2009; MACEDO, P. C., 2009a; MARTINS e ZANELLA, 2009; FAPESP, 2010b), como adição em concretos auto-adensáveis (AKRAM *et al.*, 2009; ANJOS *et al.*, 2010), como compósitos de matriz cerâmica (BORLINI *et al.*, 2006), na produção de blocos de concreto (DASSAN *et al.*, 2010), melhoram a durabilidade do concreto (FENG *et al.*, 2004b; GANESAN *et al.*, 2010).

*al.*, 2007b; CORDEIRO, G. C. *et al.*, 2009a) e de sua armadura (GANESAN *et al.*, 2007a).

Singh *et al.* (2000) analisaram a influência de diferentes porcentagens (10, 20 e 30%) de substituição do cimento pela cinza de bagaço de cana-de-açúcar, além do traço de referência, nas propriedades do cimento Portland. A resistência à compressão foi significativa principalmente para a substituição de 10% do cimento. Além disso, verificou-se que a utilização da cinza diminui a permeabilidade do material e, conseqüentemente, o torna mais resistente a ambientes agressivos.

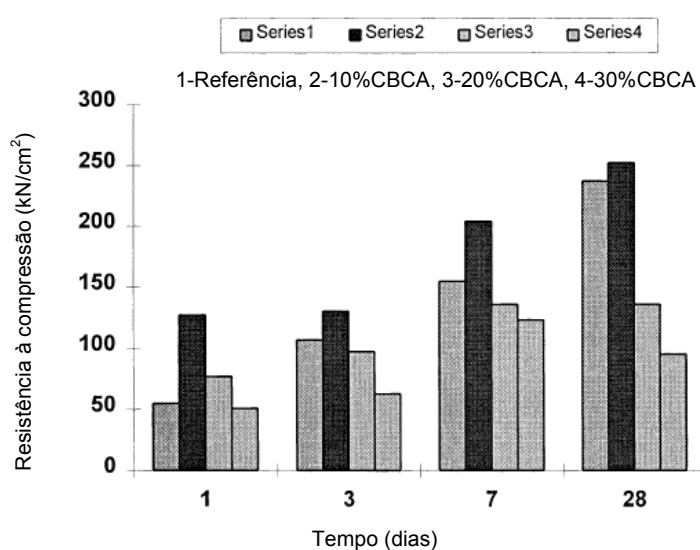


Figura 3.21 - Variação da resistência à compressão nas idades de 1, 3, 7 e 28 dias (SINGH, *et al.*, 2000).

Valenciano e Freire (2004) analisaram a influência de concretos produzidos com solo, cimento e cinza de bagaço de cana-de-açúcar, obtendo bons resultados de resistência à compressão de concretos com cinzas de bagaço de cana-de-açúcar (CBCA) em substituições de até 20% do cimento. As amostras de cinzas foram submetidas a tratamento prévio de peneiramento e moagem e em seguida analisadas por ensaios de compactação, compressão simples e absorção de água.

Cordeiro, G. C. *et al.* (2006) estudaram a influência do emprego de cinza ultrafina do bagaço de cana-de-açúcar, nas porcentagens de 10%, 15% e 20% em substituição ao cimento Portland, em concretos de alto desempenho.

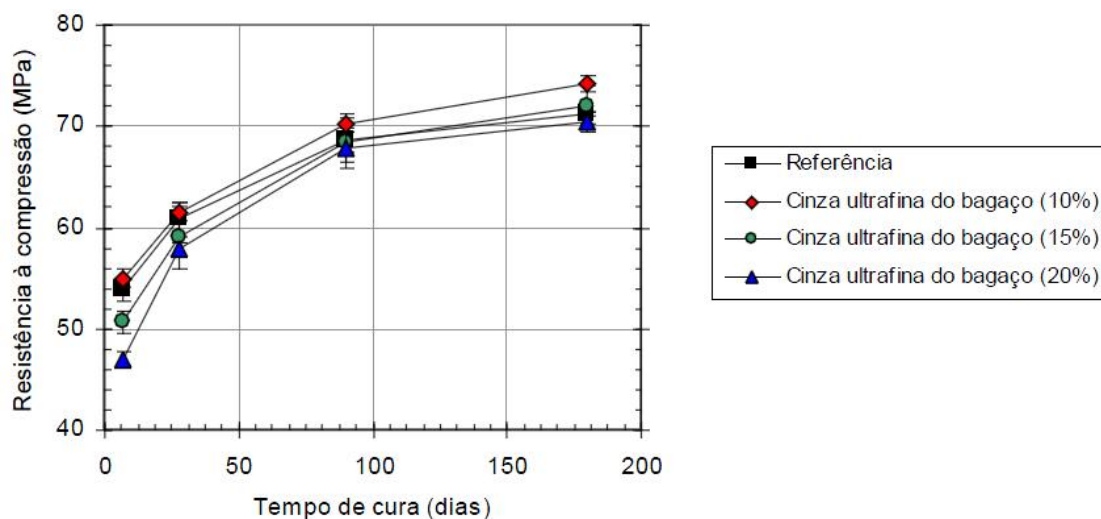


Figura 3.22 - Resistência à compressão dos concretos aos 7, 28, 90 e 180 dias (CORDEIRO, G. C. *et al.*, 2006).

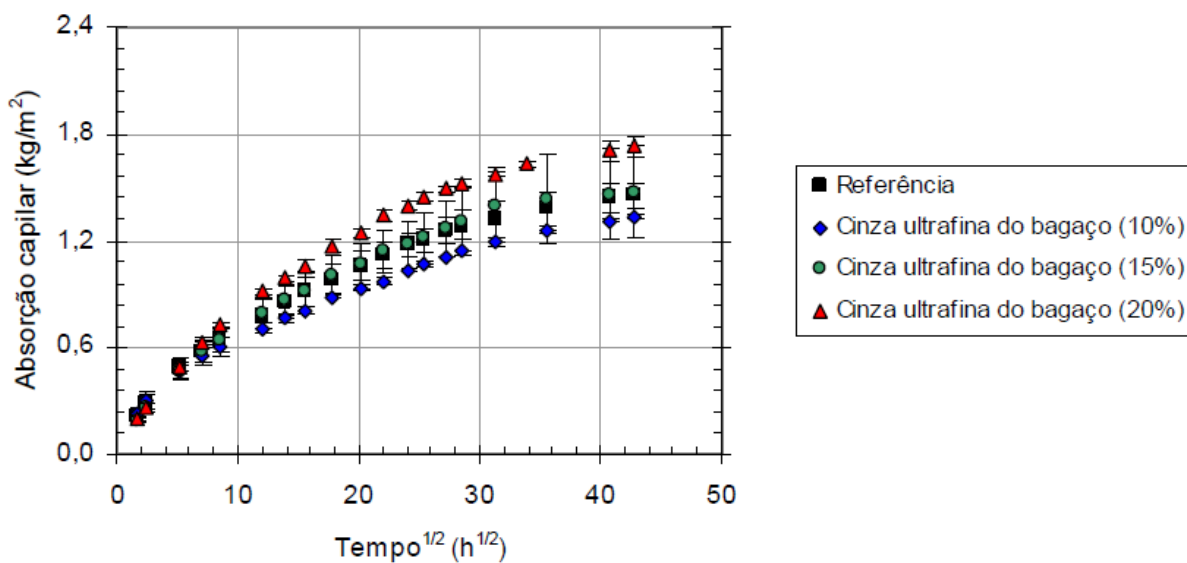


Figura 3.23 - Absorção de água por capilaridade dos concretos (CORDEIRO, G. C. *et al.*, 2006).

Os resultados acima mostram que a utilização da cinza melhorou o desempenho dos concretos, uma vez que reduziu a necessidade do consumo de superplastificantes (no caso do traço de 20% de cinza). O concreto não apresentou redução da resistência à compressão aos 180 dias e não houve um aumento da absorção capilar em concretos com a cinza em sua composição. Além disso, a cinza melhorou a classificação do concreto quanto à penetração iônica.

Paula (2006) produziu argamassas com teores de substituição do cimento Portland pela cinza de bagaço de cana entre 0 e 30%. Foi analisada a resistência à compressão aos 7 e 28 dias, indicando a possibilidade de substituição de até 20% do cimento sem causar prejuízo considerável na resistência. Verificou-se que quanto maior a porcentagem de substituição do cimento pela cinza, maior a porosidade do corpo de prova e conseqüentemente, maior a absorção de água (Figura 3.24).

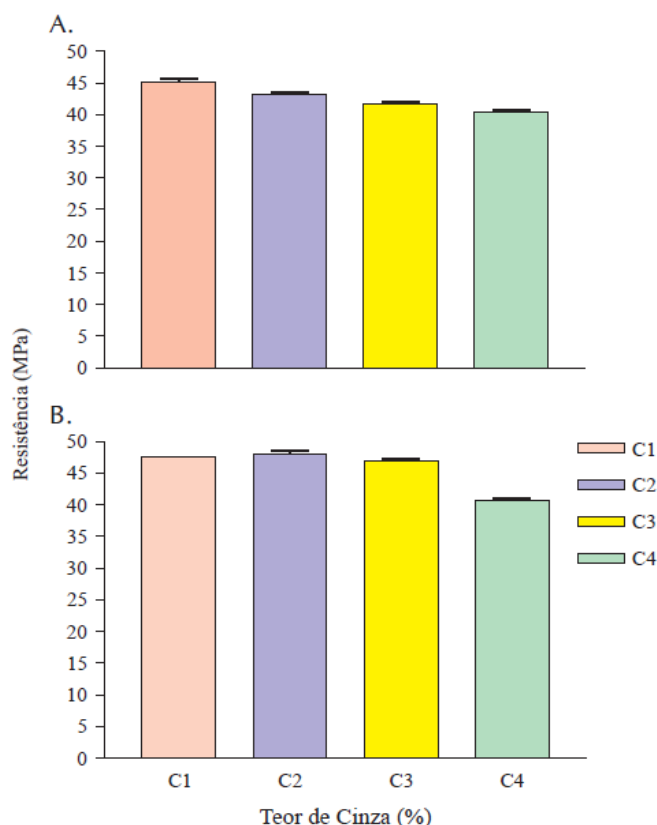


Figura 3.24 - (A.) Resistência à compressão aos 7 dias nas argamassas incorporadas com resíduos; (B.) Idem aos 28 dias (PAULA *et al.*, 2008). C1 (0% CBCA), C2 (10% CBCA), C3 (20% CBCA), C4 (30% CBCA).

Ganesan *et al.* (2007b) utilizaram sete traços de argamassas, sendo que um referência e os outros seis com 5%, 10%, 15%, 20%, 25% e 30% de substituição do cimento Portland por cinza de bagaço de cana. A utilização de até 20% de cinza foi considerada ótima do ponto de vista do desempenho da alta resistência inicial, da redução da permeabilidade de água e da resistência à penetração dos íons cloreto, melhorando a durabilidade do material (Figura 3.25).

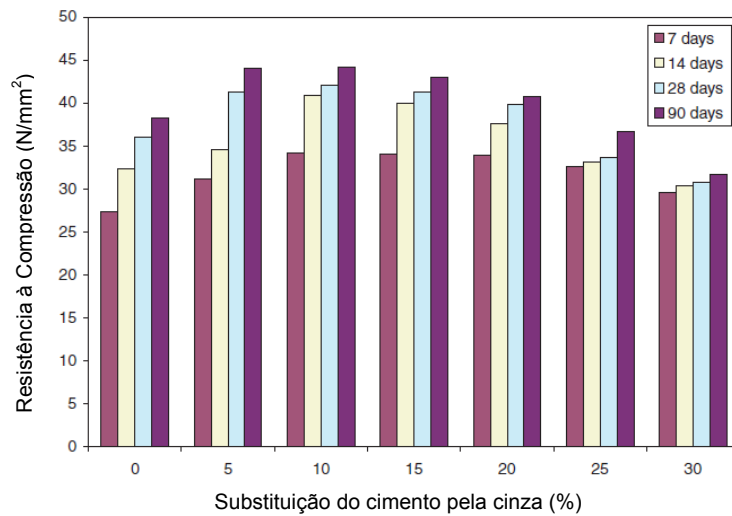


Figura 3.25 - Resistência à compressão da cinza de bagaço de cana misturada ao cimento em argamassas (GANESAN *et al.*, 2007b).

Souza, G. N. *et al.* (2007a) utilizaram três traços de argamassas, sendo que um padrão e os outros dois com 10% e 20% de substituição do cimento Portland por cinza de bagaço de cana. Os resultados experimentais mostram que ambos os traços contendo a cinza do bagaço de cana superaram a resistência à compressão em relação à argamassa sem adição da cinza (Figura 3.26). O ensaio de resistência à tração por compressão diametral mostrou que as argamassas com a utilização de cinza de bagaço de cana apresentaram valores um pouco abaixo da argamassa padrão. As argamassas com cinza em sua composição apresentaram a taxa de absorção de água maior que o traço padrão.

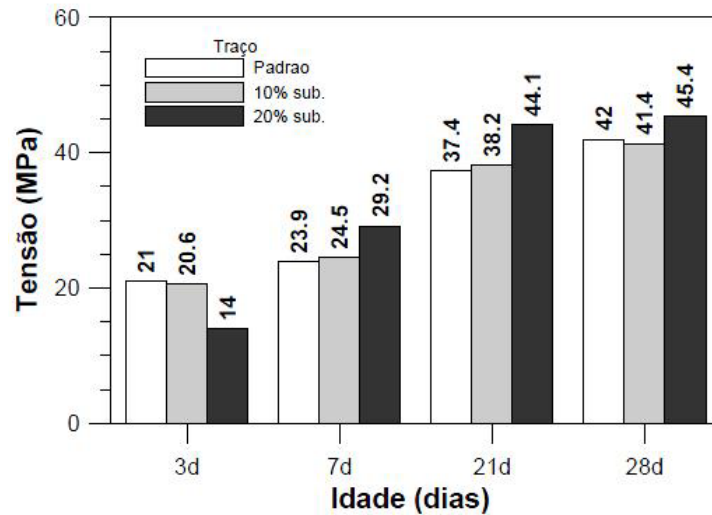


Figura 3.26 - Comparativo do aumento da resistência com o tempo (SOUZA, G. N. *et al.*, 2007a).

Cordeiro, G. C. *et al.* (2008) estudaram a atividade pozolânica e o efeito *filler* da cinza do bagaço de cana-de-açúcar junto ao cimento Portland e argamassas. A cinza utilizada foi colhida em uma usina no Estado do Rio de Janeiro, onde foram queimadas a diferentes temperaturas (700 a 900°C). O estudo mostra uma relação direta entre a resistência à compressão das argamassas com o valor da finura Blaine da cinza utilizada. Quanto maior o tamanho da partícula de cinza, menor a resistência à compressão da argamassa. O estudo mostra que a cinza do bagaço possui propriedades físico-químicas apropriadas para a utilização como adição mineral, mas sua reatividade é relativa ao tamanho da partícula do resíduo.

Nunes *et al.* (2008) estudaram concretos com adição de cinza de bagaço de cana-de-açúcar em substituição ao cimento Portland na proporções de 0% (referência), 3%, 5%, 7%, 10%, 13%, 15% e 20% em massa. Onde houve substituição de até 13% de cimento pelas cinzas, gerou-se um grande aumento na resistência, onde o maior valor foi indicado pela substituição de 7% de cinza (Figura 3.27).



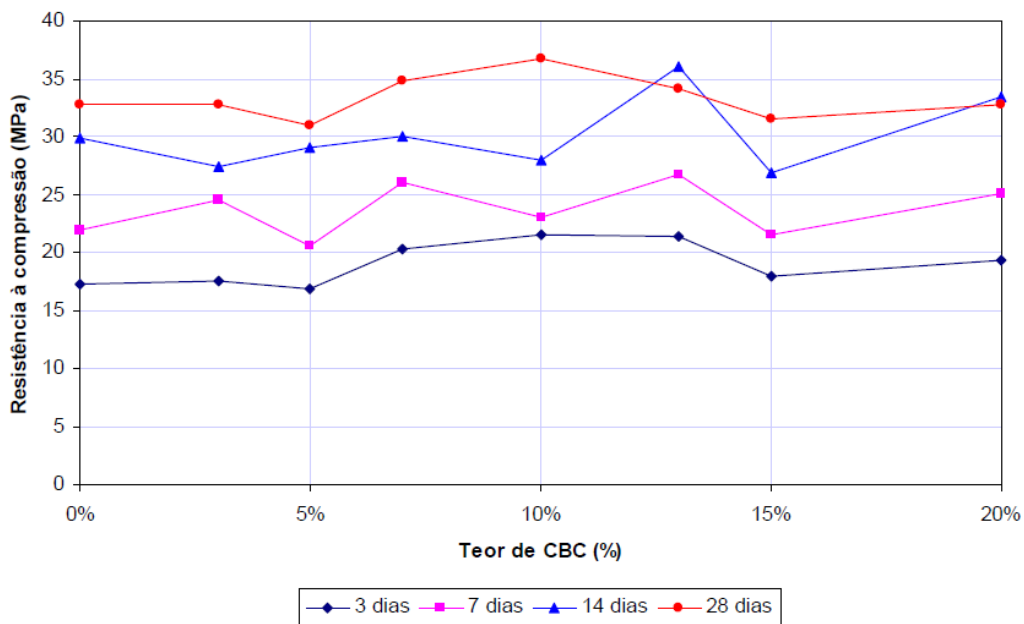


Figura 3.27 - Comportamento das resistências para 3, 7 e 28 dias em função dos teores de CBC (NUNES *et al.*, 2008).

Lima, S. A. *et al.* (2009) estudaram a viabilidade físico-química da substituição do agregado miúdo pela cinza de bagaço de cana-de-açúcar na confecção de argamassas. Foram utilizadas cinzas de quatro usinas diferentes da região de São Paulo, onde todas foram aprovadas para a substituição do agregado miúdo, por apresentarem propriedades pozolânicas insignificantes.

Cordeiro, G. C. *et al.* (2009a) estudaram concretos com adição de cinza de bagaço de cana-de-açúcar e cinza de casca de arroz expostos à solução de sulfato de magnésio ( $MgSO_4$ ) de 7,5% em um período de 1.365 dias. O concreto com CBCA apresentou menor perda de massa e de resistência comparada com a cinza de casca de arroz (CCA) (Figura 3.28).

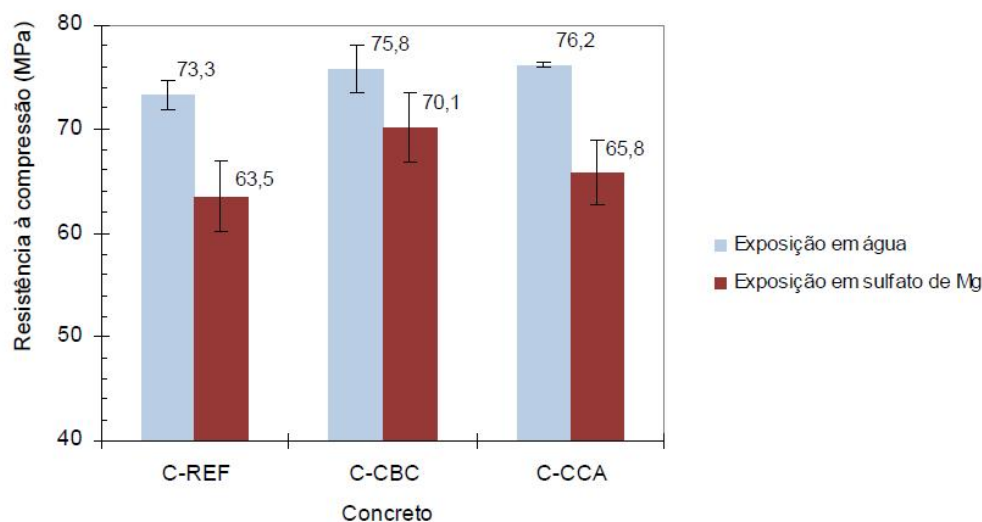


Figura 3.28 - Valores de resistência à compressão dos concretos mantidos em água e em solução de  $MgSO_4$  – 1365 dias de exposição (CORDEIRO, G. C. *et al.*, 2009a).

Pedroso *et al.* (2009) avaliaram o comportamento reológico de argamassas produzidas com a cinza de bagaço de cana-de-açúcar em substituição ao cimento, em proporções de 0% (referência), 5%, 10%, 15% e 20%, além de diferentes teores de superplastificantes. Verificou-se que a cinza do bagaço de cana-de-açúcar influencia diretamente no comportamento reológico da pasta de cimento com a utilização de superplastificante.

Martins e Zanella (2009) avaliaram a absorção por capilaridade de argamassas produzidas com a cinza de bagaço de cana-de-açúcar em substituição do agregado miúdo, em proporções de 30, 50 e 100%. A absorção por capilaridade é inversamente proporcional à quantidade de cinza de bagaço utilizada. Contudo, não foram avaliados aspectos referentes à durabilidade e propriedades mecânicas do material (Figura 3.29).

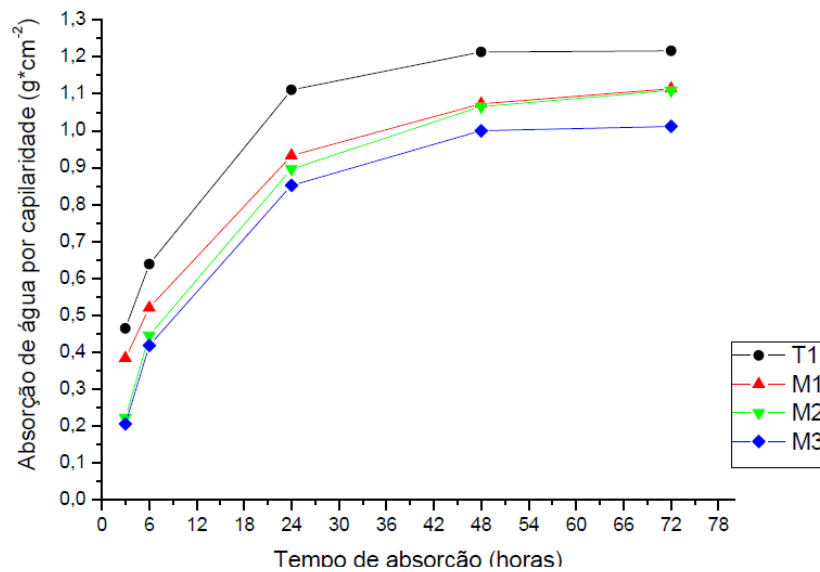


Figura 3.29 - Valores médios de absorção por capilaridade para diferentes tempos de absorção (MARTINS e ZANELLA, 2009). T1 (0% CBCA), M1 (30% CBCA), M2 (50% CBCA), M3 (100% CBCA).

Cordeiro, G. C. *et al.* (2009b) avaliaram a influência do processo de moagem da cinza do bagaço de cana-de-açúcar na sua pozolanicidade, onde verificaram que valores de granulometria abaixo de 60  $\mu\text{m}$  e área de superfície específica Blaine acima de 300  $\text{m}^2/\text{kg}$  fornecem produtos que podem ser considerados como pozolânicos, independente do moinho utilizado no processo de cominuição. Além disso, a cinza moída através de moinhos vibratórios, quando utilizada em até 20% de substituição ao cimento Portland na confecção do concreto, apresentou as mesmas respostas mecânicas que o concreto referência, sem o resíduo. Esta mesma relação proporcionou melhorias na reologia do concreto no estado fresco e a resistência ao ataque de íons de cloreto.

Fairbairn *et al.* (2010) estudaram a influência da substituição de parte do cimento Portland pela cinza de bagaço de cana-de-açúcar em escala industrial na diminuição das emissões de  $\text{CO}_2$  para a atmosfera. Os resultados mostram que a substituição do cimento pela cinza reduz a emissão do dióxido de carbono da ordem de 519,3 mil toneladas por ano.

Anjos *et al.* (2010) avaliaram a influência da adição da cinza de biomassa de cana-de-açúcar em concretos auto-adensáveis. Foram feitos quatro traços: substituição

ao cimento e à areia (em 20%) pela cinza, além de um traço para referência (sem nenhuma adição) e um traço com aditivo modificador de viscosidade. A adição de cinza melhorou o comportamento do concreto no estado fluido, a resistência à compressão e os índices físicos analisados.

Castaldelli *et al.* (2010) utilizaram a cinza do bagaço de cana-de-açúcar “*in natura*” na confecção de concretos, substituindo o cimento em 0%, 5%, 10%, 15% e 20%. Quanto maior o teor de cinza nos corpos de prova, menor foi a resistência à compressão, mas melhorou o material quanto à absorção de água.

Cordeiro, G. C. *et al.* (2010) utilizaram uma cinza de bagaço de cana-de-açúcar com alto teor de carbono na confecção de argamassas. Foram avaliadas a resistência à compressão, a compactidade e a retração por secagem. Devido à pouca reatividade da cinza, os resultados indicaram perda de resistência e aumento da retração em relação à substituição do cimento pela cinza, melhorando somente a sua compactidade.

## 4. MATERIAIS E MÉTODOS

Neste trabalho foram caracterizadas as cinzas de bagaço de cana-de-açúcar produzidas em uma usina na região do Triângulo Mineiro. Com elas foram produzidos argamassas para concretos estruturais (microconcretos) cujos desempenhos foram avaliados em ensaios físicos e mecânicos.

### 4.1 Materiais

Foram estudadas as cinzas de bagaço de cana-de-açúcar produzidas pela combustão em caldeira na Usina Caeté S/A, localizada na cidade Delta/MG (Figura 4.1). Esta usina foi escolhida por ter um processo de queima controlado e por estar localizada na Mesorregião do Alto Paranaíba e Triângulo Mineiro, que possui um percentual expressivo da produção estadual de cana-de-açúcar. Não houve autorização da empresa para obter registro fotográfico do processo de produção.



Figura 4.1 - Localização do Município Delta (Adaptado PORTAL MINAS-GERAIS.NET, 2010).

A Usina Caeté possui três caldeiras para a queima do bagaço de cana com capacidades de 90 ton/h, 130 ton/h e 150 ton/h. A previsão para 2010 é da utilização de 4,5 milhões de toneladas de cana-de-açúcar, que produzirão cerca de 9 milhões de sacas de 50 kg cada de açúcar, 89 milhões de litros de álcool e 49 milhões de kWh de energia. No processo de geração de energia são produzidas diariamente cerca de 12 toneladas de cinzas, que são dispostas em pátios ou no solo. Considerando que a usina trabalha 24 horas por dia e 365 dias por ano, a produção de cinza somente nesta usina é da ordem de 105 mil toneladas por ano.

As cinzas são produzidas em caldeiras onde a temperatura de combustão varia de 600°C a 800°C. Em função do processo adotado na usina são produzidos três tipos de cinza: a cinza pesada e dois tipos de cinzas volantes. As cinzas pesadas ficam depositadas no fundo da caldeira e são ricas em areia proveniente do solo em que a cana é cultivada, motivo pelo qual não foram estudadas neste trabalho.

Para o estudo foram coletados os dois tipos de cinzas volantes: a primeira denominada cinza grossa *in natura* e a segunda denominada cinza fina *in natura*. A cinza grossa é obtida no processo de peneiramento da água de lavagem dos gases. A cinza fina é coletada nos filtros que tratam a água de lavagem dos gases após o peneiramento. As cinzas utilizadas foram coletadas no mês de setembro de 2010.

As cinzas *in natura* apresentam alto teor de umidade, portanto, as mesmas foram colocadas em uma estufa marca DeLeo (Figura 4.2) a uma temperatura média de 65°C durante aproximadamente 3 dias de forma a retirar a umidade.



Figura 4.2 - Estufa utilizada para a secagem das cinzas.

Após a secagem das cinzas e a realização de ensaios preliminares de reatividade pozolânica, optou-se por submeter as cinzas ao processo de beneficiamento por moagem em moinho de bolas durante 10 horas, de forma a obter uma granulometria similar das cinzas analisadas. O processo foi realizado em panela de moagem nas dimensões de 350 mm de diâmetro e 370 mm de comprimento e volume interno de 24,39 dm<sup>3</sup>. Para um volume de cinzas de 12 dm<sup>3</sup> foi utilizado a carga de moagem de 18,84 kg, cujas características são descritas na Tabela 4.1 e Figura 4.3.

Tabela 4.1 - Perfil da carga do moinho de bolas.

<b>Diâmetro das bolas de alumina sinterizada</b>	<b>Quantidade</b>	<b>Massa (kg)</b>
25 mm	511	10,54
50 mm	42	8,30
<b>TOTAL (kg)</b>	<b>553</b>	<b>18,84</b>



Figura 4.3 - Esferas de alumina sinterizada utilizadas no moinho.

Com as cinzas moídas foram produzidos compósitos cimentícios para fins estruturais sem adição de agregados graúdos (microconcretos) utilizando cimento Tipo CPI (clínquer e gesso). A Lafarge Brasil, localizada na cidade de Matozinhos/MG, produziu especialmente para este trabalho o cimento obtido pela mistura de 95% de clínquer e 5% de gesso. O cimento foi processado em moinho piloto (Figura 4.4), com bolas de ferro fundido, motor de 1.720 RPM, corrente de 5,7 A, potência de 4 CV e tensão de 440 V. A carga do moinho está descrita na Tabela 4.2. O moinho de bolas foi alimentado com 12 kg de material, sendo processado por 70 minutos.

Tabela 4.2 - Perfil da carga do moinho piloto (dados fornecidos pela Lafarge).

<b>Diâmetro das bolas de ferro fundido</b>	<b>Massa (kg)</b>
90 mm	42
80 mm	3
70 mm	30
60 mm	30
50 mm	42
40 mm	14,5
30 mm	25,5
25 mm	20
20 mm	22
<b>TOTAL (kg)</b>	<b>229</b>





Figura 4.4 - Moinho piloto utilizado na moagem do cimento.

Após o processamento da mistura clínquer/gesso foram produzidos os compósitos cimentícios com substituição parcial de 0, 10, 15, 20 e 30% em massa de cimento pelo volume equivalente de cinzas. O traço de referência foi estabelecido com base no recomendado para avaliação de resistência à compressão de cimentos na norma NBR 7.215 (ABNT, 1996): 1 de cimento para 3 de agregado miúdo, areia normatizada fornecida pelo Instituto Tecnológico do Estado de São Paulo (IPT) e fatores água/cimento de 0,50. A opção de se controlar o fator água/aglomerante e a relação aglomerante/areia se deve ao fato de que essa pesquisa se insere no estudo maior que avalia o desempenho de cimentos especiais confeccionados com cinzas de bagaço de cana. Utilizaram-se as granulometrias de 1,2 mm, 0,6 mm, 0,3 mm e 0,15 mm em iguais proporções. A utilização dessa areia segue as exigências da norma NBR 7.215 (ABNT, 1996). Para a confecção dos microconcretos foi utilizada água potável, fornecida pela Companhia de Saneamento de Minas Gerais, COPASA/MG.

## 4.2 Procedimento experimental

O procedimento experimental adotado neste trabalho pode ser observado no fluxograma da Figura 4.5, o qual consistiu basicamente em ensaios de caracterização química, física, mecânica e de durabilidade. Os ensaios em sua

maioria foram realizados em laboratórios da Universidade Federal de Minas Gerais e do CEFET/MG (unidades Campus II em Belo Horizonte e Araxá).

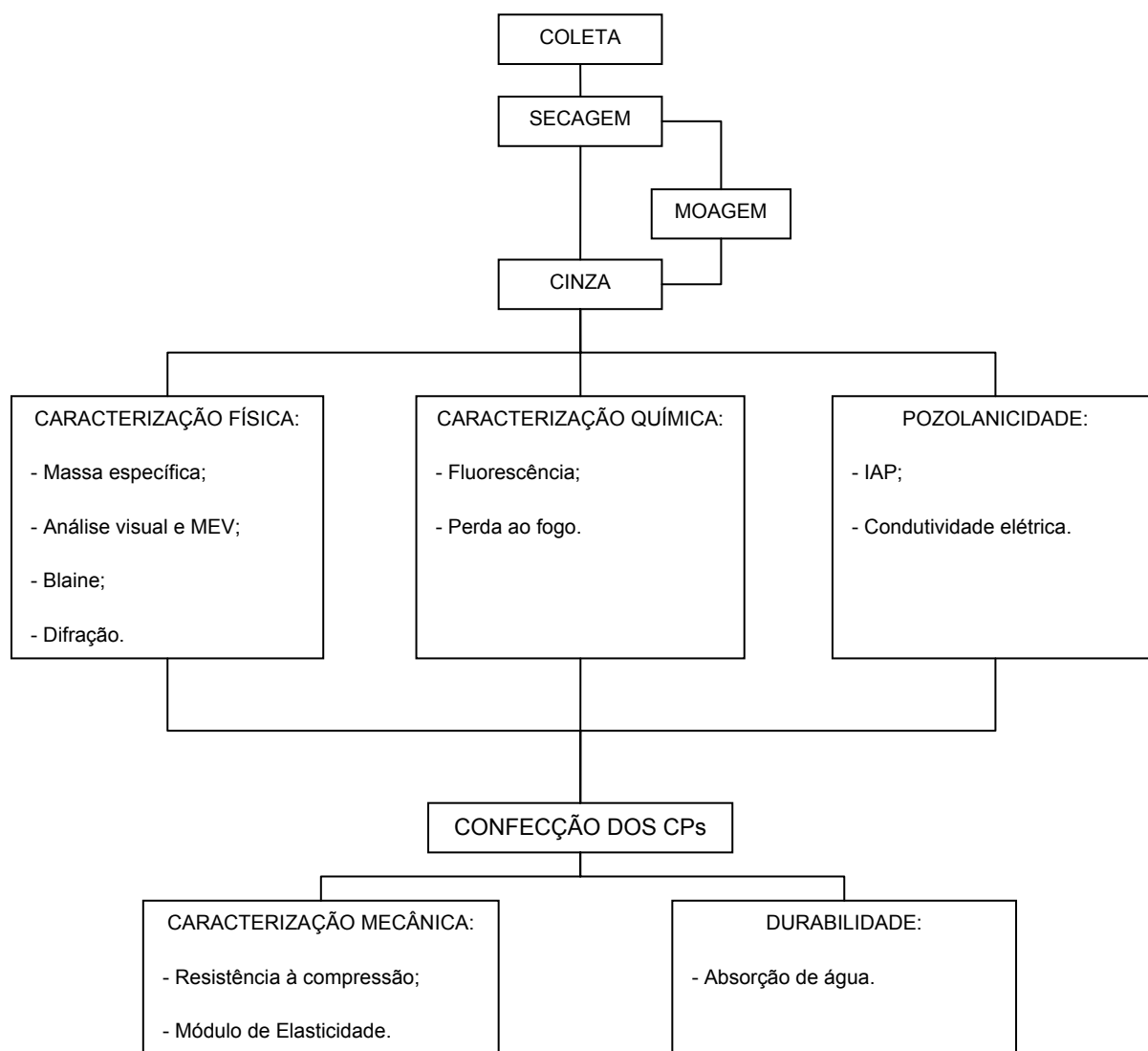


Figura 4.5 - Fluxograma do procedimento experimental.

#### 4.2.1 Análise macro e microestrutural

A análise macroestrutural se deu por análise visual à vista desarmada. A análise microestrutural foi realizada utilizando técnicas de Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV). A análise via MEV foi realizada em equipamento de baixo vácuo, modelo Quanta 200F, tipo de canhão FEG, marca FEI (Figura 4.6). As amostras das cinzas *in natura* (pulverizadas) foram espalhadas sobre uma fita de carbono

previamente colada em um porta-amostra. Em função do baixo vácuo não foi necessária a metalização da amostra.



Figura 4.6 - Equipamento para ensaio de Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV).

#### 4.2.2 Massa específica

A determinação da massa específica do cimento Portland e das cinzas *in natura* e moída se fez necessária para a realização do ensaio de determinação do índice de atividade pozolânica, uma vez que neste ensaio a substituição do cimento pelo material a ser analisado é realizada em volume.

A massa específica do cimento foi determinada de acordo com a norma NBR NM 23 (ABNT, 2000). A massa específica das cinzas foi realizada adicionando-se 500 ml ( $V_i$ ) de água nos frasco de Le Chatelier (Figura 4.7), de forma que o líquido ficasse na marca de 0 ml visível na graduação do tubo. Foram pesadas as cinzas (40 g da fina *in natura*, 40 g da fina moída, 40 g da grossa moída e 15 g de cinza grossa *in natura*). As amostras de cada cinza foram colocadas dentro do frasco e após 15 minutos feitas as leituras do novo volume ( $V_f$ ). De posse dos dados, a massa

específica ( $\rho$ ) de cada cinza foi determinada dividindo-se a massa do material ( $m$ ) pela diferença de volume do recipiente utilizado, conforme equação 4.1:

$$\rho = m / (V_f - V_i) \quad (4.1)$$



Figura 4.7 - Frascos de Le Chatelier utilizados para realizar o ensaio de massa específica das cinzas.

### 4.2.3 Índice de atividade pozolânica

A atividade pozolânica das cinzas foi avaliada de acordo com a norma NBR 5.752 (ABNT, 1992) que determina o índice de atividade pozolânica (IAP%), o qual é determinado pela relação entre a resistência à compressão, aos 28 dias, de uma argamassa confeccionada com 35% de material pozolânico ( $f_{cc}$ ) e da argamassa produzida apenas com cimento ( $f_{cp}$ ):

$$IAP\% = (f_{cp}/f_{cc}) \times 100 \quad (4.2)$$

A mistura dos materiais e a moldagem dos corpos de prova foram realizadas seguindo a norma NBR 7.215 (ABNT, 1996). Os ensaios foram realizados utilizando-se a mistura clínquer/gesso. Para cada proporção foram moldados 5 corpos de prova cilíndricos, com diâmetro de 5 cm e comprimento de 10 cm, com traço definido de acordo com a Tabela 4.3 e com a Tabela 4.4, tendo com base as normas NBR 7.215 (ABNT, 1996) e NBR 5.752 (ABNT, 1992).

Tabela 4.3 - Proporção de materiais utilizados para confecção de microconcretos com as cinzas *in natura* para a determinação do índice de atividade pozolânica.

<b>Quantidade utilizada em gramas (g)</b>			
<b>Materiais</b>	<b>Cinza fina <i>in natura</i></b>	<b>Cinza grossa <i>in natura</i></b>	<b>Referência</b>
<b>Cimento</b>	405,60	405,60	624,00
<b>Cinza</b>	108,47	38,04	0
<b>Água</b>	312	312	312
<b>Areia IPT #16</b>	468	468	468
<b>Areia IPT #30</b>	468	468	468
<b>Areia IPT #50</b>	468	468	468
<b>Areia IPT #100</b>	468	468	468

Tabela 4.4 - Proporção de materiais utilizados para confecção de microconcretos com as cinzas moídas para a determinação do índice de atividade pozolânica.

<b>Quantidade utilizada em gramas (g)</b>			
<b>Materiais</b>	<b>Cinza fina moída</b>	<b>Cinza grossa moída</b>	<b>Referência</b>
<b>Cimento</b>	405,60	405,60	624,00
<b>Cinza</b>	141,96	126,45	0
<b>Água</b>	312	312	312
<b>Areia IPT #16</b>	468	468	468
<b>Areia IPT #30</b>	468	468	468
<b>Areia IPT #50</b>	468	468	468
<b>Areia IPT #100</b>	468	468	468

Nas primeiras 24 horas de cura, os corpos de prova foram mantidos nos moldes, sendo desmoldados após este período e colocados em recipientes hermeticamente fechados e estanques, à temperatura ambiente, durante 28 dias. Após este período, os corpos de prova foram retirados da cura e submetidos ao ensaio de resistência à compressão.

#### 4.2.4 Condutividade elétrica

A pozolanicidade das cinzas também foi avaliada pelo método descrito por Luxan *et al.* (1989). O método consiste em medir a variação de condutividade de uma solução saturada de  $\text{Ca(OH)}_2$  com e sem adição do material a ser avaliado.

A solução saturada foi preparada adicionando-se 2 g de hidróxido de cálcio puro a 200 ml de água destilada em agitação e pré-aquecida a 40 °C. Após a dissolução completa do  $\text{Ca(OH)}_2$ , a solução foi diluída com água destilada em um balão volumétrico de um litro. Após a decantação, 200 ml de solução filtrada foram aquecidos sob agitação à temperatura de 40 °C. Após a estabilização da temperatura, foi introduzido um sensor de condutividade da Marca Digimed, conforme visto na Figura 4.8 e realizada a medição da condutividade. Em seguida, foram adicionadas 5 g da cinza a ser analisada. Transcorridos dois minutos da adição, foi realizada nova medida de condutividade. O índice de atividade pozolânica foi então calculado subtraindo-se as condutividades medidas antes e após a pozolana ser adicionada à solução.



Figura 4.8 - Condutímetro medindo condutividade e temperatura da solução de  $\text{Ca(OH)}_2$  saturada.

#### 4.2.5 Perda ao fogo

A perda ao fogo (%PF) foi realizada baseada nos procedimentos prescritos na norma NBR NM 18 (ABNT, 2004). Na execução do ensaio optou-se pelo método A, “Determinação direta - método de referência”, que consiste em colocar a amostra de 1,000g (+/- 0,001g) em um cadinho de porcelana tarado e calcinar em forno mufla (Figura 4.9) à temperatura de 950 °C (+/-50°C), por 20 minutos e, após o resfriamento, calcular a variação de massa. Esta opção se deu em função dos materiais disponíveis para o ensaio.

O valor de perda ao fogo foi obtido pela média aritmética de três determinações dadas pela equação 4.3:

$$\%PF = ((m_1 - m_2) / m) \times 100 \quad (4.3)$$

onde:  $m_1$  é a tara do cadinho somada à massa de amostra ensaiada, em gramas (g);  $m_2$  é a massa do cadinho somada à da amostra, após calcinação, em gramas (g) e  $m$  é a massa da amostra utilizada no ensaio, em gramas (g).



Figura 4.9 - Mufla utilizada para o ensaio de perda ao fogo.

#### 4.2.6 Superfície específica

A superfície específica da mistura aglomerante foi realizada pelo método Blaine, segundo a norma NBR NM 76 (ABNT, 1998). A finura foi determinada pelo método de peneiramento a úmido (Figura 4.10) descrito nas normas NBR 11.579 (ABNT, 1991) e NBR 9.202 (ABNT, 1985). A pressão da água utilizada no ensaio foi de 200 mm. Para o cálculo da massa retida na peneira #200, foram utilizadas 20 g do cimento com fator de correção de 1,19 durante 3 minutos. Para o cálculo da massa retida na peneira #325, foram utilizadas 10 g do cimento com fator de correção de 1,05 durante 5 minutos.



Figura 4.10 - Equipamento utilizado para o peneiramento do cimento.

Em função de dificuldades experimentais para o peneiramento das cinzas, optou-se por utilizar o método Blaine para avaliação da granulometria média dos materiais estudados (cinzas moídas e cimento), a qual foi determinada pela Lafarge Brasil, segundo a norma NBR NM 76 (ABNT, 1998).

#### 4.2.7 Espectrometria de fluorescência de raios X

A identificação e quantificação dos elementos químicos presentes nas cinzas foi feita através do ensaio de espectrometria de fluorescência de raios X, no equipamento AXIOS DY 758, na empresa Lafarge Brasil (Figura 4.11).





Figura 4.11 - Equipamento para ensaio de espectrometria de fluorescência de raios X - AXIOS DY 758 (Fornecido pela Lafarge Brasil).

#### 4.2.8 Difração de raios X

A amostra foi submetida à análise qualitativa por difratometria de raios X realizada em um Difratorômetro Philips, modelo PW1710, utilizando radiação  $\text{CuK}\alpha$  e cristal monocromado de grafita, velocidade de varredura de  $0,06^\circ 2\theta/\text{s}$ , tempo de contagem de 1s, intervalo de varredura de  $4^\circ$  até  $90^\circ 2\theta$  (Figura 4.12).

O método de análise adotado se baseia na comparação dos valores das distâncias interplanares e das intensidades dos picos nos difratogramas das amostras analisadas e uma amostra de referência, utilizando o padrão do banco de dados PDF-2 do ICDD – International Centre for Diffraction Data.

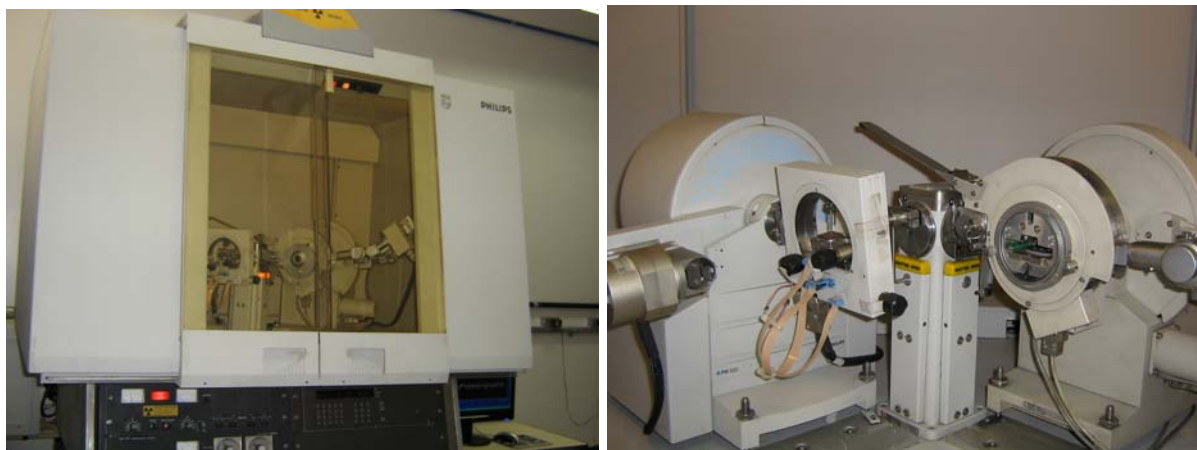


Figura 4.12 - Difratorômetro Philips, modelo PW1710.

#### 4.2.9 Confeção dos microconcretos

Em função dos resultados preliminares de caracterização das cinzas, optou-se por utilizar apenas as cinzas moídas na confecção dos microconcretos. Foram produzidos 18 corpos de prova, nas dimensões de 5 cm de diâmetro por 10 cm de comprimento, para cada traço estudado (adições de 0, 10, 15, 20 e 30%), correspondendo a um total de 162. A confecção dos compósitos cimentícios se deu substituindo-se uma determinada massa de cimento por uma porção de cinzas correspondente ao volume de cimento considerado. Na Tabela 4.5 e na Tabela 4.6 são apresentados os traços analisados.

Tabela 4.5 - Proporção de materiais utilizados para confecção de microconcretos com cinza de bagaço de cana-de-açúcar fina moída.

<b>Quantidade utilizada em gramas (g)</b>					
<b>Materiais</b>	<b>Referência</b>	<b>10% cinza</b>	<b>15% cinza</b>	<b>20% cinza</b>	<b>30% cinza</b>
<b>Cimento</b>	624,00	561,60	530,40	499,20	436,80
<b>Cinza</b>	0	40,62	60,84	81,12	121,73
<b>Água</b>	312	312	312	312	312
<b>Areia IPT #16</b>	468	468	468	468	468
<b>Areia IPT #30</b>	468	468	468	468	468
<b>Areia IPT #50</b>	468	468	468	468	468
<b>Areia IPT #100</b>	468	468	468	468	468

Tabela 4.6 - Proporção de materiais utilizados para confecção de microconcretos com cinza de bagaço de cana-de-açúcar grossa moída.

<b>Quantidade utilizada em gramas (g)</b>					
<b>Materiais</b>	<b>Referência</b>	<b>10% cinza</b>	<b>15% cinza</b>	<b>20% cinza</b>	<b>30% cinza</b>
<b>Cimento</b>	624,00	561,60	530,40	499,20	436,80
<b>Cinza</b>	0	36,13	54,19	72,26	108,39
<b>Água</b>	312	312	312	312	312
<b>Areia IPT #16</b>	468	468	468	468	468
<b>Areia IPT #30</b>	468	468	468	468	468
<b>Areia IPT #50</b>	468	468	468	468	468
<b>Areia IPT #100</b>	468	468	468	468	468

A massa de cinza necessária para substituição do cimento foi calculada a partir do volume de cimento que corresponde à massa de cimento que se deseja substituir (massa específica de cada uma das cinzas dividida pela massa específica da mistura clínquer/gesso e multiplicada pela massa do cimento referente ao percentual de substituição).

Os corpos de prova foram confeccionados com os materiais descritos no item 4.1. O microconcreto foi preparado por um misturador mecânico (Figura 4.13) e

compactada manualmente em moldes (Figura 4.14). A moldagem dos corpos de prova foi feita imediatamente após o amassamento. A colocação da argamassa no molde foi feita com o auxílio de uma espátula, em quatro camadas, recebendo cada camada 30 golpes uniformes com o soquete normal, homogeneamente distribuídos.



Figura 4.13 - Misturador mecânico utilizada para misturar os diferentes traços de microconcretos.



Figura 4.14 - Moldes utilizadas para a confecção dos corpos de prova de microconcretos.

Os corpos de prova foram desmoldados após 24 horas após sua confecção e depois foram submetidos à cura por imersão até a data de ruptura (Figura 4.15).



(a) (b)  
Figura 4.15 - Corpos de prova desmoldados e devidamente identificados (a) e colocados em um recipiente para a cura (b).

#### 4.2.10 Resistência à compressão

Após o ensaio de frequência ressonante, nas idades de 3, 7 e 28 dias, os corpos de prova foram capeados com enxofre e submetidos ao ensaio de resistência à compressão, de acordo com a normalização brasileira. Foram ensaiados à compressão 5 corpos de prova para cada traço para cada idade. Também foram ensaiados os corpos de prova confeccionados para a determinação do índice de pozolanicidade. Uma máquina universal de ensaios da marca EMIC (Figura 4.16), modelo DL30000N, foi utilizada para a realização dos ensaios de resistência à compressão. Uma célula de carga de 300 kN e uma velocidade de 50 mm/min foram escolhidas para este ensaio.



Figura 4.16 - Equipamento de ensaios de compressão.

#### **4.2.11 Determinação do módulo de elasticidade**

Os corpos de prova confeccionados com diferentes teores de cinza, nas idades de 3, 7 e 28 dias, foram ensaiados para a determinação do módulo de elasticidade utilizando o método de frequência ressonante forçada, no modo longitudinal. Foram ensaiados 5 corpos de prova de cada traço e realizadas 10 leituras da frequência ressonante. Para este ensaio foi utilizado o equipamento ERUDITE MKII (Figura 4.17) e frequências de 15 KHz a 25 KHz. A determinação do campo de frequência a ser aplicado se deu com base nas dimensões do corpo de prova e no ábaco da Figura 4.18.

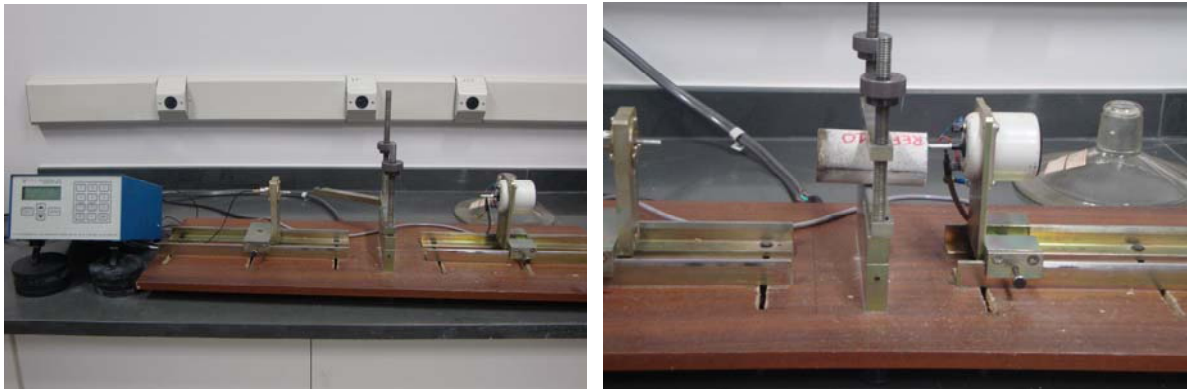
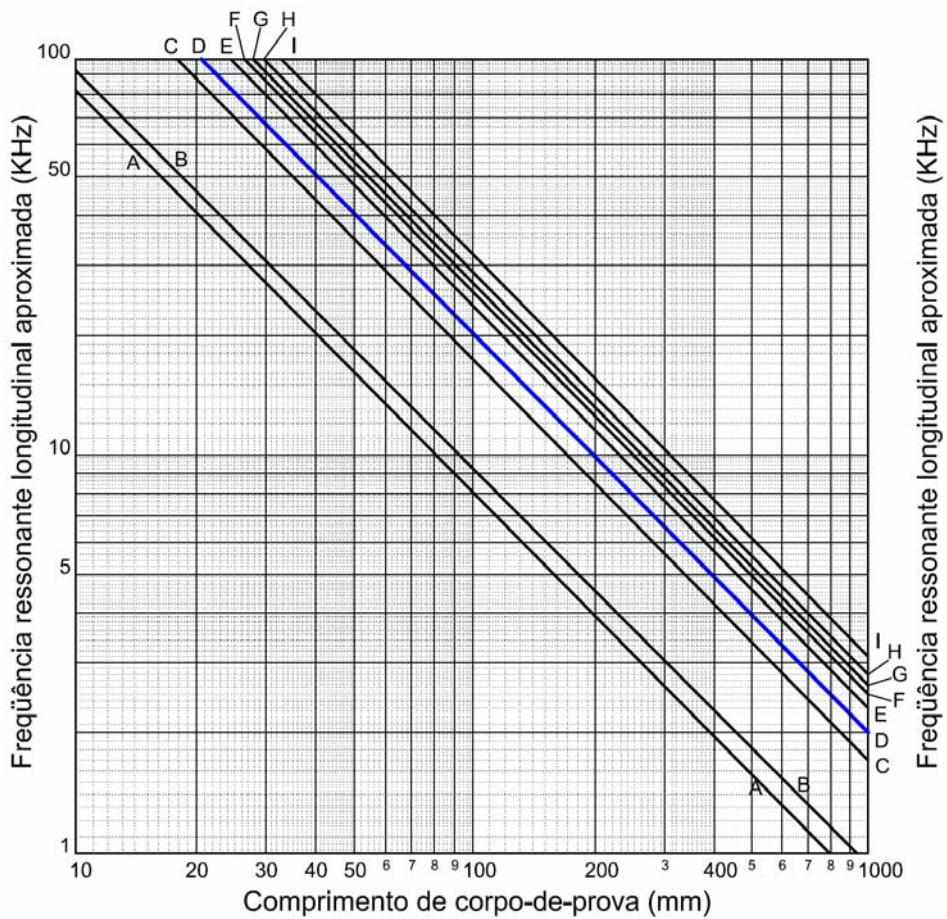


Figura 4.17 - Ensaio de módulo de elasticidade por frequência ressonante forçada.



A = Acetal      B = Acrílico      C = Latão      D = Ouro e Concreto      E = Cristal de chumbo, Ferro fundido e Tungstênio  
 F = Aço      G = Ligas de alumínio      H = Vidro      I = Carboneto de tungstênio

Figura 4.18 - Frequência ressonante longitudinal aproximada (CNS Eletronics, 1995).

O módulo de elasticidade dinâmico ( $E_D$ ) para o modo longitudinal em  $\text{MN/m}^2$  é dado pela equação (ASTM, 2008):

$$E_D = 4n^2L^2\rho \times 10^{-12} \quad (4.4)$$

onde  $L$  é o comprimento do corpo de prova em mm,  $n$  é a frequência do modo fundamental da vibração longitudinal em Hz e  $\rho$  é a densidade em  $\text{kg/m}^3$ .

#### 4.2.12 Absorção de água

A permeabilidade dos microconcretos foi avaliada por ensaios de absorção por imersão tomando por base a NBR 9.778 (ABNT, 2005). Foram analisados 3 corpos de prova por cada traço. Os compósitos, após 28 dias de cura, foram submetidas à secagem em estufa a uma temperatura de  $\pm 105^\circ\text{C}$  por dois dias, no decorrer dos quais era feita a avaliação da constância de massa. Após serem retirados da estufa, foram deixados ao ar livre até o seu resfriamento, a fim de evitar taxas iniciais elevadas de absorção de água.

Depois desse procedimento, os corpos de prova foram imersos em um recipiente com água, à temperatura de:  $(23 \pm 2)^\circ\text{C}$ , onde permaneceram por dois dias. No final de cada dia os corpos de prova eram retirados da água, enxugados superficialmente com toalha absorvente e em seguida pesados até a avaliação da constância da massa de água adquirida.

A partir das massas determinadas, a absorção de água por imersão foi definida através da média de três amostras de ensaio, segundo a equação:

$$\text{Absorção por imersão} = [(M_{\text{sat}} - M_s)/M_s] \times 100 \quad (4.5)$$

onde:  $M_{\text{sat}}$  é a massa do corpo de prova saturada (g) e  $M_s$  é a massa do corpo de prova seco em estufa (g).

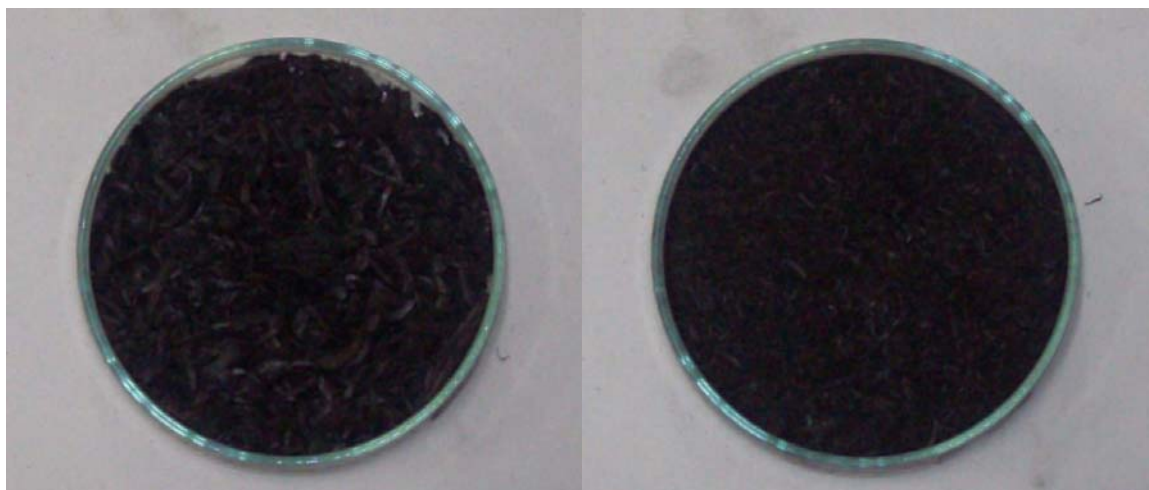


## 5. RESULTADOS E DISCUSSÕES

### 5.1 Análise macro e microestrutural

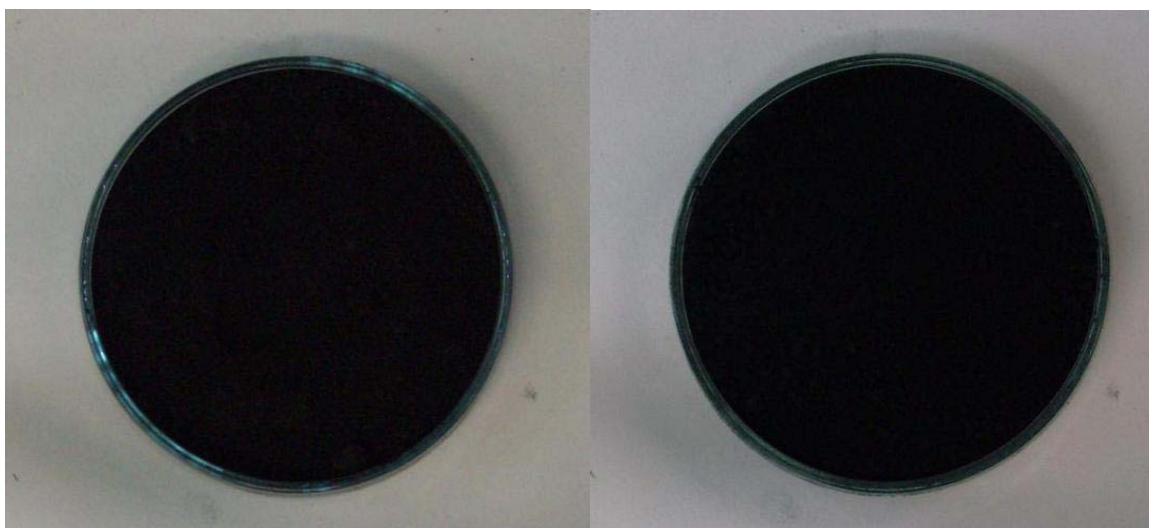
#### 5.1.1 Análise macroscópica

Observando à vista desarmada as diferentes cinzas, cujas fotografias são apresentadas na Figura 5.1, foi possível identificar que a cinza fina *in natura* (b) possui granulometria mais refinada que a cinza grossa *in natura* (a) da usina. A cinza fina *in natura* apresenta grande umidade, quando esfregada entre os dedos, as partículas se desconectam, diminuindo seu tamanho. Já a cinza grossa (a) apresenta partículas maiores, com textura rugosa e em um formato tubular, semelhante ao bagaço de cana-de-açúcar (Figura 3.12a), mas quando esfregada nos dedos essas partículas são também desagregadas. Ambas as cinzas moídas (c) e (d) apresentam textura de talco, sendo que à vista desarmada não é possível identificar diferenças em suas granulometrias.



(a)  
Cinza grossa *in natura*

(b)  
Cinza fina *in natura*



(c)  
Cinza grossa moída

(d)  
Cinza fina moída

Figura 5.1 - Cinzas de bagaço de cana-de-açúcar *in natura* grossa (a) e fina (b) e depois do processo de beneficiamento através da moagem, grossa moída (c) e fina moída (d).

Na cinza fina *in natura*, visualmente detecta-se a presença de partículas de quartzo, como mostra a Figura 5.2. Nas cinzas grossas *in natura* não foram visualizadas partículas de quartzo, mas verificou-se a presença de bagaço sem a completa carbonização durante o processo de combustão (Figura 5.3).



(a)

(b)

Figura 5.2 - Cinzas de bagaço de cana-de-açúcar grossa *in natura* (a) e fina *in natura* (b) antes da moagem, com identificação da presença visível de quartzo.



Figura 5.3 - Cinza grossa *in natura* seca.

### 5.1.2 Análise microscópica

Os resultados da Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) das cinzas *in natura* são apresentados na Figura 5.4 e na Figura 5.5 em diferentes ampliações (100X e 500X). É possível identificar com o aumento de 100X através da Figura 5.4 o mesmo aspecto alongado da cinza grossa observado na análise macroscópica (Figura 5.3).

A microscopia eletrônica permite identificar a superfície rugosa da cinza grossa (Figura 5.4). Nota-se que a cinza fina (Figura 5.5) apresenta aspecto cristalino, com uma forma mais compacta e textura mais suave.

Na ampliação de 100X é evidenciado o aspecto lamelar e a distribuição de tamanho das partículas mais homogênea nas cinzas grossas, enquanto que nas cinzas finas existe uma variação nas formas das partículas, onde estas possuem um aspecto mais poroso.

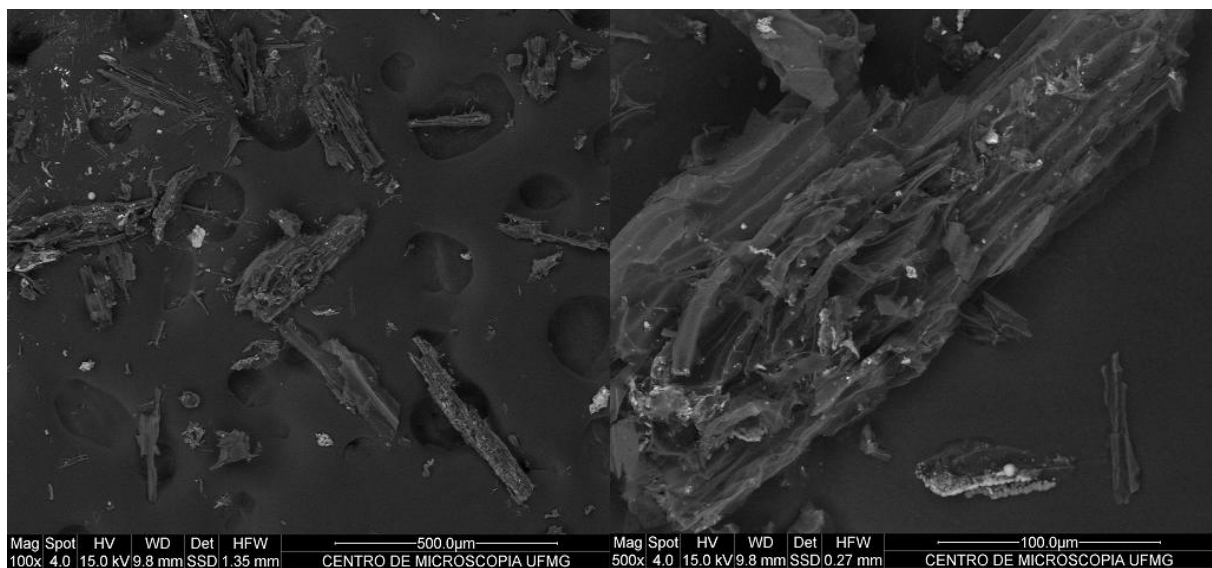


Figura 5.4 - Microscopia Eletrônica de Varredura da cinza de bagaço de cana-de-açúcar “*in natura*” grossa.

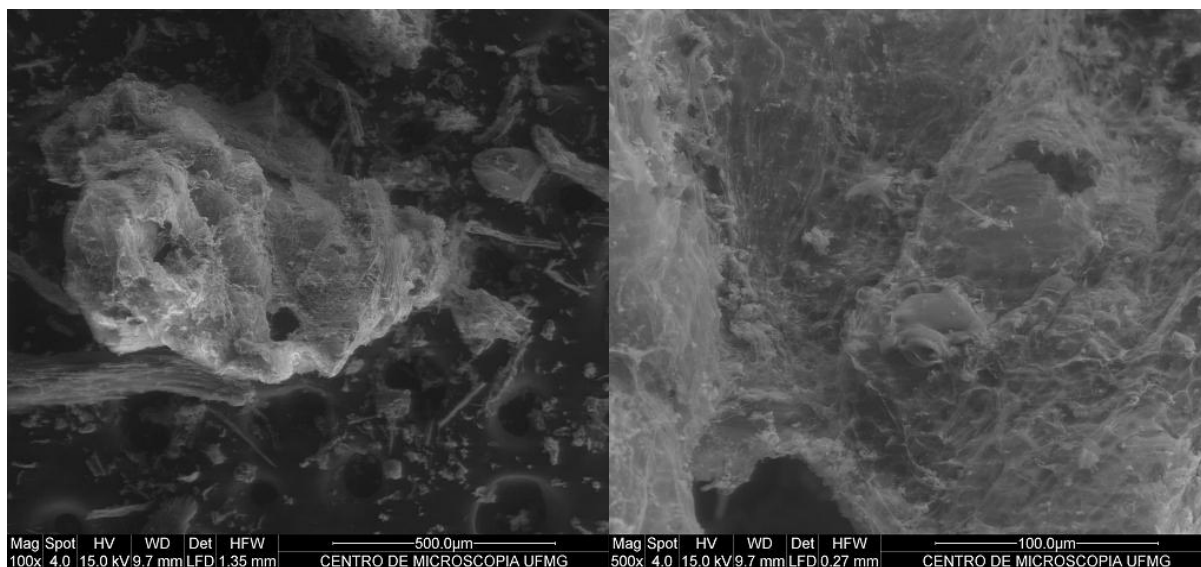


Figura 5.5 - Microscopia Eletrônica de Varredura da cinza de bagaço de cana-de-açúcar “*in natura*” fina.

Ainda analisando a cinza fina, na Figura 5.6 identifica-se uma partícula característica de quartzo, o que confirma a presença de partículas de areia na cinza.

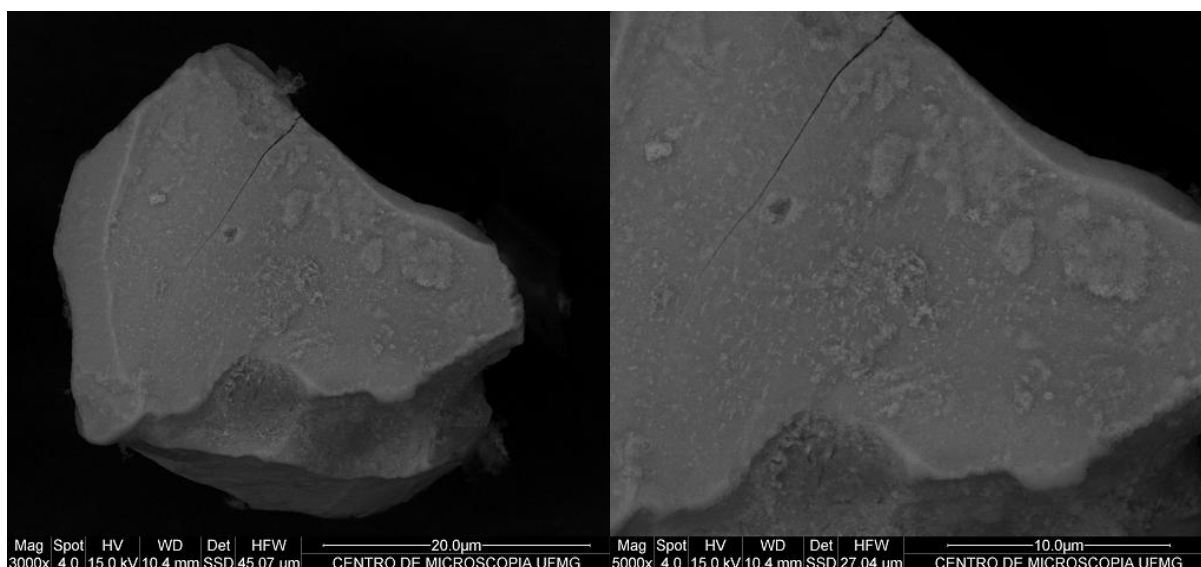


Figura 5.6 - Microscopia eletrônica de varredura da cinza de bagaço de cana-de-açúcar fina – identificação de partículas de quartzo.

## 5.2 Massa específica

A massa específica do cimento (clínquer + gesso), determinada de acordo com a NBR NM 23 (ABNT, 2000), foi de  $3.140 \text{ kg/m}^3$ . A massa específica do CPV foi de  $3.160 \text{ kg/m}^3$ . Segundo Isaia (2010), a massa específica do cimento fica em torno de  $3.150 \text{ kg/m}^3$ .

Os valores obtidos no ensaio Le Chatelier para as cinzas *in natura* e moídas, assim como a massa específica calculada a partir desses dados através da equação 4.1, são apresentadas na Tabela 5.1.

Tabela 5.1 - Dados do ensaio de massa específica das cinzas *in natura* e moídas.

<b>Cinzas</b>	<b>Massa utilizada (g)</b>	<b>Volume deslocado (ml)</b>	<b>Massa específica (g/cm<sup>3</sup>)</b>
<b>Fina <i>in natura</i></b>	40	25,5	1,569
<b>Grossa <i>in natura</i></b>	15	27	0,556
<b>Fina moída</b>	40	19,5	2,051
<b>Grossa moída</b>	40	22	1,818

Como era de se esperar, as cinzas apresentam massas específicas significativamente inferiores às do aglomerante utilizado. Isto significa que para um mesmo volume, a massa das cinzas será bem menor que a de cimento, indicando que a substituição do cimento pelas cinzas deve ser feito por volume equivalente.

Observa-se também que o processo de cominuição das partículas de cinza influencia inversamente no valor da massa específica. O processo de moagem influenciou diretamente no aumento da massa específica, diminuindo a diferença desta propriedade entre as cinzas moídas, que chegaram a valores bem próximos.

## 5.3 Índice de atividade pozolânica (IAP)

Na Figura 5.7 são apresentados os resultados do ensaio de resistência à compressão referentes às amostras para a avaliação do índice de atividade

pozolânica para as cinzas *in natura*, com a indicação do valor do desvio padrão no topo de cada coluna. Os valores apresentados se referem à média de 5 medições para cada condição analisada. Os resultados indicam que o traço de referência apresenta 46,1 MPa de resistência à compressão, os microconcretos confeccionados com cinzas finas apresentam 25,2 MPa e os com cinzas grossas, 23,4 MPa. Estes dados mostram que essas cinzas não possuem atividade pozolânica segundo o critério da norma NBR 12.653 (ABNT, 1992), onde os corpos de prova confeccionados com a cinza devem ter pelo menos 75% da resistência do traço de referência aos 28 dias. Ambas as cinzas não ultrapassam 54,7% da resistência padrão.

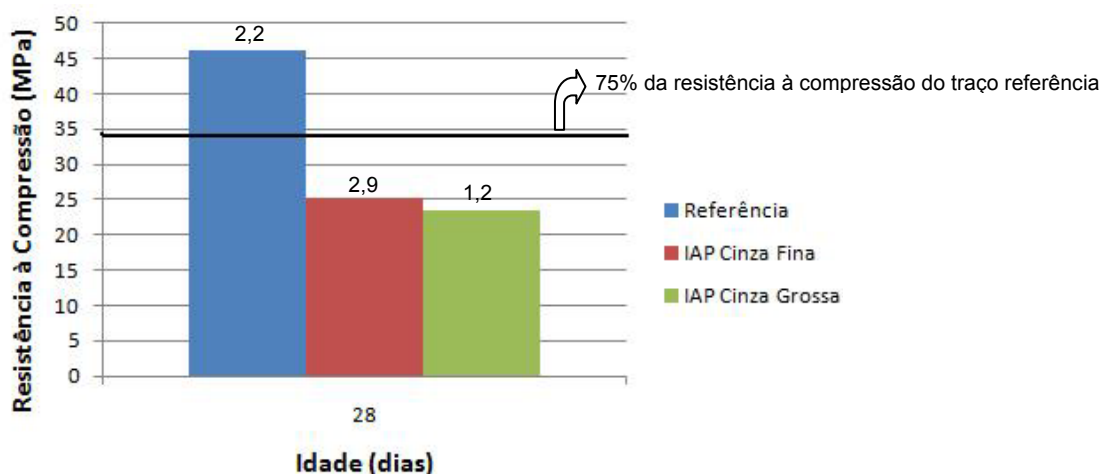


Figura 5.7 - Resistência à compressão em microconcretos confeccionados para avaliação do IAP de cinzas *in natura*.

A Figura 5.8 apresenta os dados de resistência à compressão dos microconcretos confeccionados com substituição de 35% da mistura clínquer/gesso pela cinza fina ou grossa moídas, em volume, comparadas com o traço de referência. Os valores apresentados se referem à média de 5 medições para cada situação analisada e o desvio padrão está apresentado no topo de cada coluna. Os resultados indicam que o traço de referência apresenta 41,6 MPa de resistência à compressão e os microconcretos confeccionados com cinzas, 32,9 MPa (fina moída) e 34,4 MPa (grossa moída). Os dados mostram que a cinza grossa moída apresenta 82,84% da resistência do corpo de prova de referência aos 28 dias. No caso da cinza fina moída, este valor é de 79,25%. Segundo a norma NBR 12.653 (ABNT, 1992), as

cinzas moídas podem ser consideradas pozolânicas, uma vez que os corpos de prova que as incorporam apresentaram valores maiores que 75% da resistência da amostra de referência.

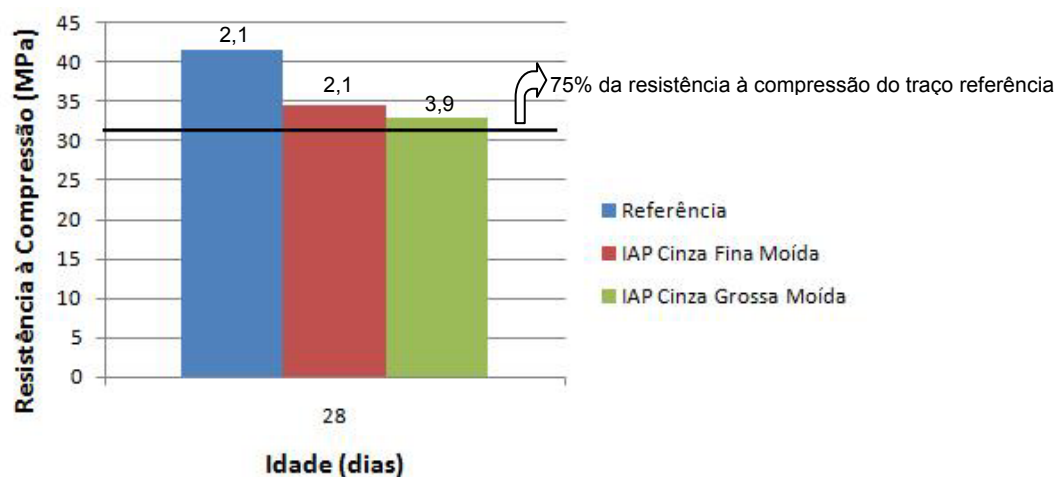


Figura 5.8 - Resistência à compressão em microconcretos confeccionados para avaliação do IAP das cinzas moídas.

Os resultados acima indicam que a moagem das cinzas *in natura* contribui para a melhoria da resistência mecânica dos compostos cimentícios. Isto poderia estar relacionado à atividade pozolânica das cinzas ou ao efeito *filler*.

## 5.4 Condutividade elétrica

Os valores obtidos no ensaio de condutividade elétrica baseado no método descrito por Luxan *et al.* (1989) são apresentados na Tabela 5.2. Segundo o método, a variação de condutividade (valor inicial – valor final) permite classificar a pozolanicidade do material analisado: se o material for uma pozolana, espera-se que a condutividade da solução com cinzas seja menor que a solução inicial, devido à menor quantidade de íons  $\text{Ca}^{+2}$  e  $(\text{OH})^-$  na solução com resíduo. Dessa forma o material é classificado em:

- materiais sem atividade pozolânica:  $< 0,4$  mS/cm;
- materiais de atividade pozolânica moderada:  $< 1,2$  mS/cm;
- materiais de boa atividade pozolânica:  $> 1,2$  mS/cm.



Tabela 5.2 - Condutividade elétrica pelo método proposto por Luxan *et al.* (1989).

<b>Cinza</b>	<b>Condutividade Inicial (mS/cm)</b>	<b>Condutividade final (mS/cm)</b>	<b>Varição de condutividade (inicial – final)</b>
Cinza fina <i>in natura</i>	7,515	7,760	-0,245
Cinza grossa <i>in natura</i>	7,440	13,492	-6,052
Cinza fina moída	7,341	6,797	0,544
Cinza grossa moída	7,523	6,730	0,793

Os dados da Tabela 5.2 mostram que as cinzas *in natura* apresentam condutividade menor que 0,4 mS/cm, sendo classificadas então como materiais sem atividade pozolânica. Depois de moídas, as cinzas demonstraram valores de condutividade entre 0,4 mS/cm e 1,2 mS/cm, sendo então consideradas como materiais de atividade pozolânica moderada. Analisando as cinzas *in natura*, observa-se que as cinzas mais finas são mais reativas. Considerando a diferença de tamanho das cinzas *in natura* e que a única variável entre as cinzas *in natura* e as cinzas moídas é o tamanho de suas partículas, pode-se concluir que o processo de moagem melhora a reatividade do resíduo. Isto estaria de acordo com os resultados de Cordeiro, G. C. *et al.* (2009b) que relatam que partículas com granulometria abaixo de 60  $\mu\text{m}$  e Blaine acima de 300  $\text{m}^2/\text{kg}$  fornecem produtos que podem ser considerados como pozolânicos.

## 5.5 Perda ao fogo

Os resultados de perda ao fogo e os respectivos desvios padrões são listados na Tabela 5.3. Considerando que a perda de massa do ensaio se refere à perda de umidade, matéria volátil e carbono livre (CORDEIRO, G. C., 2006), comumente se utiliza esse ensaio para estimar o teor de carbono das amostras. O teor de carbono seria diretamente proporcional à perda de massa de uma amostra de cinza seca submetida ao ensaio. Dentro desse raciocínio, observa-se que a cinza grossa *in natura* apresenta maior teor de carbono enquanto a cinza fina *in natura* apresenta

menor porcentagem de carbono. Provavelmente a cinza grossa apresenta menor teor de sílica que a cinza fina.

Considerando a influência da área superficial na cinética de reação, é de se esperar que as amostras mais finas de uma cinza apresentem maior perda de massa. Isto só é observado para a cinza fina *in natura*, que apresentou maior perda de massa que a amostra fina moída.

Os dados da Tabela 5.3, mesmo sendo contraditórios, poderiam ser analisados segundo a norma NBR 12.653 (ABNT, 1992): as cinzas *in natura* e moídas, antes de passarem pelo processo de cominuição, não atendem ao critério da norma, onde o valor máximo de perda ao fogo admissível varia de 6 a 10% para que ele seja classificado como pozolânico. A moagem não modifica essa classificação.

Tabela 5.3 - Perda ao fogo das cinzas de bagaço de cana-de-açúcar.

<b>Cinza</b>	<b>Perda ao fogo (%)</b>	<b>Desvio padrão</b>
Cinza fina <i>in natura</i>	20,9	6,6
Cinza grossa <i>in natura</i>	68,5	14,1
Cinza fina moída	23,3	5,8
Cinza grossa moída	23,3	15,3

Os resultados acima não reforçam os dados do ensaio de condutividade e do IAP. Segundo estes dois últimos ensaios, as cinzas moídas apresentam boa atividade pozolânica, o que não é indicado pelo ensaio de perda ao fogo. Considerando a heterogeneidade das amostras e sua influência na perda ao fogo, optou-se por desconsiderar os resultados desse ensaio e trabalhar nos microconcretos apenas com as cinzas que passaram nos ensaios de condutividade e IAP: cinzas finas e grossas moídas.

## **5.6 Superfície específica**

A superfície específica do cimento e os resultados do ensaio de peneiramento são apresentados na Tabela 5.4. Com os dados obtidos no peneiramento, é possível

calcular a finura do cimento dada pela equação a seguir, segundo as normas NBR 11.579 (ABNT, 1991) e NBR 9.202 (ABNT, 1985):

$$F_i = ((R \times C) / (M) \times 100 \quad (5.1)$$

onde  $F_i$  é o índice de finura do material;  $R$  é o resíduo do material;  $M$  é a massa do material e  $C$  é o fator de correção da peneira.

Tabela 5.4 - Caracterização dimensional do cimento (clínquer/gesso).

Blaine	495 m <sup>2</sup> /kg
Retido na #200	0,83 g
Finura #200	4,93%
Retido na #325	0,86 g
Finura #325	9,03%

Observa-se que a mistura cimentícia clínquer/gesso possui um Blaine de 495 m<sup>2</sup>/kg, valor maior que o requerido para todos os cimentos citados na norma NBR NM 76 (ABNT, 1998). Isto indica que o aglomerante preparado para o trabalho tem a sua reatividade favorecida pela granulometria. Além disso, segundo Isaia (2010), os cimentos de alta resistência inicial (CPV ARI) são os mais finos, apresentando valores médios de área específica próximos de 490 m<sup>2</sup>/kg, valor bem próximo ao encontrado no aglomerante utilizado no estudo.

A finura do cimento calculada a partir do valor retido na peneira #200, de malha 0,075 mm (4,93%) está de acordo com a norma NBR 11.579 (ABNT, 1991), que define que essa massa tem que ser menor ou igual a 12,0%, garantindo assim uma reatividade mínima do cimento. A massa retida na peneira #325, de malha 0,044 mm (9,03%), apesar de não ser especificada pela norma NBR 9.202 (ABNT, 1985), contribui para uma maior reatividade do cimento.

Os resultados da análise dimensional das cinzas são apresentados na Tabela 5.5. Observa-se que as cinzas apresentam áreas superficiais similares após o processo de moagem.

Tabela 5.5 - Área superficial específica (Blaine) nas cinzas fina e grossa moídas.

<b>Cinzas</b>	<b>Blaine</b>
Cinza fina moída	1.195 m <sup>2</sup> /kg
Cinza grossa moída	1.112 m <sup>2</sup> /kg

Segundo Mehta e Monteiro (2008), os valores normalmente encontrados do Blaine para diferentes materiais são: cerca de 500 m<sup>2</sup>/kg para a escória de alto-forno (partículas menores do que 45 µm), de 300 a 400 m<sup>2</sup>/kg para a cinza volante (partículas maiores do que 45 µm, sendo a maioria menor que 20 µm), de 40.000 a 60.000 m<sup>2</sup>/kg para a casca de arroz (partículas menores do que 45 µm) e cerca de 20.000 m<sup>2</sup>/kg para a sílica ativa (partículas com diâmetro médio de 0,1 µm). Verifica-se que os valores de Blaine encontrados para as cinzas moídas são maiores que os relatados para escória de alto-forno e cinza volante. Já em relação à casca de arroz e à sílica ativa, as partículas de cinza de bagaço moídas estudadas apresentam maiores superfícies específicas.

Cordeiro, G. C. *et al.* (2008) relatam que a resistência à compressão de argamassas é inversamente proporcional ao valor da finura Blaine. Isto indicaria que as cinzas analisadas são potencialmente reativas e benéficas ao concreto. Para a análise da reatividade das cinzas frente à especificação da NBR 12.653 (ABNT, 1992), seria necessário inferir a dimensão das partículas, que apenas com a informação do Blaine, sem o conhecimento da forma, é uma avaliação muito grosseira.

## 5.7 Espectrometria de fluorescência de raios X

A análise da composição química por espectrometria de fluorescência de raios X da cinza de bagaço de cana-de-açúcar está indicada na Tabela 5.6 (cinza grossa moída) e na Tabela 5.7 (cinza fina moída).

A cinza fina moída apresenta um teor de SiO<sub>2</sub> 139% maior que a cinza grossa moída. Este composto químico, quando controlada a condição de queima e a granulometria da cinza, pode apresentar potencial químico e físico para desenvolver

atividade pozolânica e/ou *filler* (PAULA, 2006; NUNES *et al.*, 2008). Este fato leva a crer que a cinza fina moída deve apresentar melhor potencial pozolânico que a cinza grossa moída.

Tabela 5.6 - Composição química da cinza de bagaço de cana-de-açúcar grossa moída (Adaptado dos dados fornecidos pela Lafarge).

<b>Elemento</b>	<b>Fórmula composta</b>	<b>Concentração (%)</b>
Na	Na <sub>2</sub> O	0,049
Mg	MgO	2,627
Al	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	4,396
Si	SiO <sub>2</sub>	29,695
P	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	3,640
S	SO <sub>3</sub>	5,708
K	K <sub>2</sub> O	11,108
Ca	CaO	18,997
Ti	TiO <sub>2</sub>	3,887
Fe	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	17,227
Cl	Cl	2,665

Tabela 5.7 - Composição química da cinza de bagaço de cana-de-açúcar fina moída (Adaptado dos dados fornecidos pela Lafarge).

<b>Elemento</b>	<b>Fórmula composta</b>	<b>Concentração (%)</b>
Na	Na <sub>2</sub> O	0,152
Mg	MgO	1,170
Si	SiO <sub>2</sub>	70,984
P	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	1,775
S	SO <sub>3</sub>	1,017
K	K <sub>2</sub> O	3,307
Ca	CaO	2,198
Ti	TiO <sub>2</sub>	4,151
Mn	MnO	0,202
Fe	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	14,210
Sr	SrO	0,323
Zr	ZrO <sub>2</sub>	0,109
Cl	Cl	0,402
<Al>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,000

Os compostos  $\text{SiO}_2+\text{Al}_2\text{O}_3+\text{FeO}_3$  presentes na cinza grossa somam 51,318% e, na cinza fina, 85,194%. O teor de  $\text{Na}_2\text{O}$  nas referidas cinzas são de 0,049 e 0,152, respectivamente. Considerando esses dois índices, a cinza grossa seria uma pozolana classe E, e a cinza fina uma pozolana mais reativa (classe N), segundo a norma NBR 12.653 (ABNT, 1992). Quanto ao teor de  $\text{SO}_3$ , as cinzas grossas não atendem a referida norma, enquanto a cinza fina atende as classes N e E.

## 5.8 Difração de raios X

Os resultados da análise de difração de raios X das cinzas grossa e fina moídas são apresentados na Figura 5.9 e na Figura 5.10, respectivamente, onde são destacados os picos referentes ao quartzo.

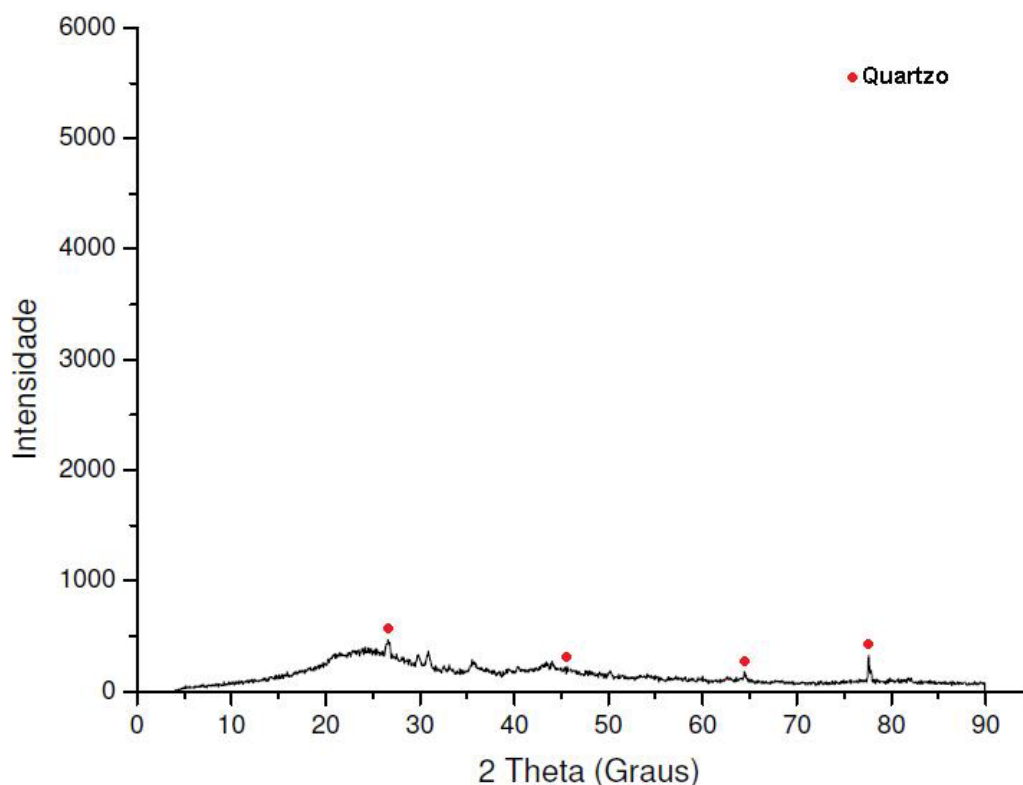


Figura 5.9 - Difração de raios X da cinza grossa moída.

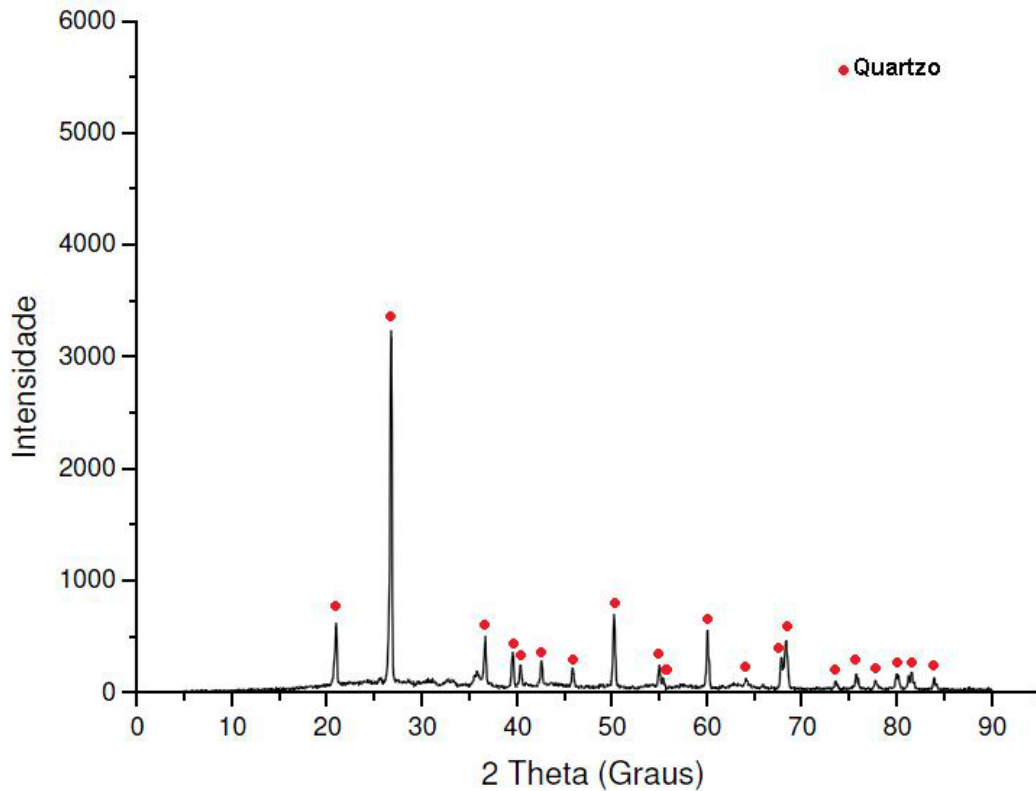


Figura 5.10 - Difração de raios X da cinza fina moída.

A análise das figuras acima mostra que a cinza grossa moída apresenta um diagrama de difração mais difuso: a cinza fina moída apresenta picos que são associados à presença de quartzo (material cristalino), enquanto que na cinza grossa tais picos são escassos. Nas condições em que os ensaios foram realizados, tais configurações são características de materiais cristalinos e amorfos, respectivamente (CALLISTER, 2006; ISAIA, 2010). Identifica-se a presença de  $\text{SiO}_2$  na forma de quartzo (estrutura cristalina hexagonal) nas duas cinzas. Desta forma, os resultados acima sugerem que apenas a cinza fina moída apresenta o arranjo predominantemente cristalino. Isto indicaria que essa cinza seria menos reativa que a cinza grossa, considerada uma mesma granulometria e uma mesma composição química.

## 5.9 Resistência à compressão

A resistência mecânica à compressão de microconcretos fabricados com diferentes teores de cinzas finas moídas (10, 15, 20 e 30%) em substituição ao clínquer/gesso, além do traço de referência (0%), determinadas nas idades de 3, 7 e 28 dias, é apresentada na Figura 5.11, na Figura 5.12 e na Figura 5.13 a seguir. Na Figura 5.11, a evolução da resistência com o tempo de cura é apresentada na forma de linhas para as diferentes adições, e o desvio padrão na forma de barras finas. Na Figura 5.12 e na Figura 5.13, os valores médios da resistência são apresentados na forma de gráfico de barras, em função do teor de substituição e do tempo de cura, respectivamente.

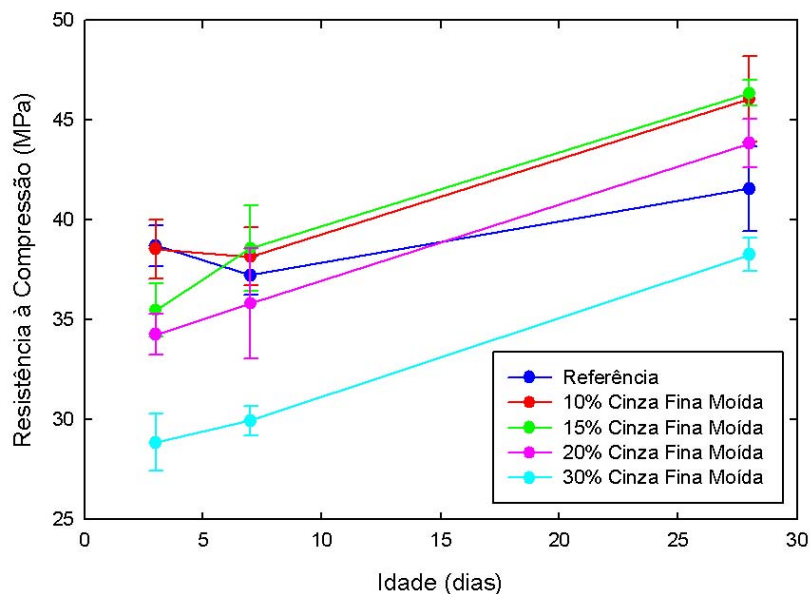


Figura 5.11 - Resistência à compressão em relação à idade dos corpos de prova confeccionados com cinza fina moída, considerando o desvio padrão.



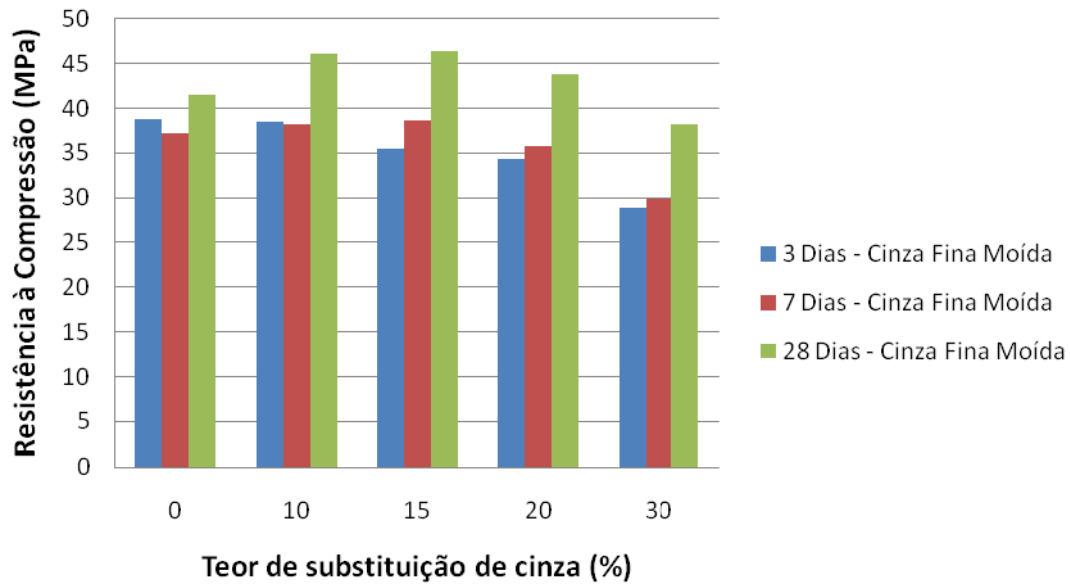


Figura 5.12 - Resistência à compressão em relação ao teor de substituição de cinza fina moída.

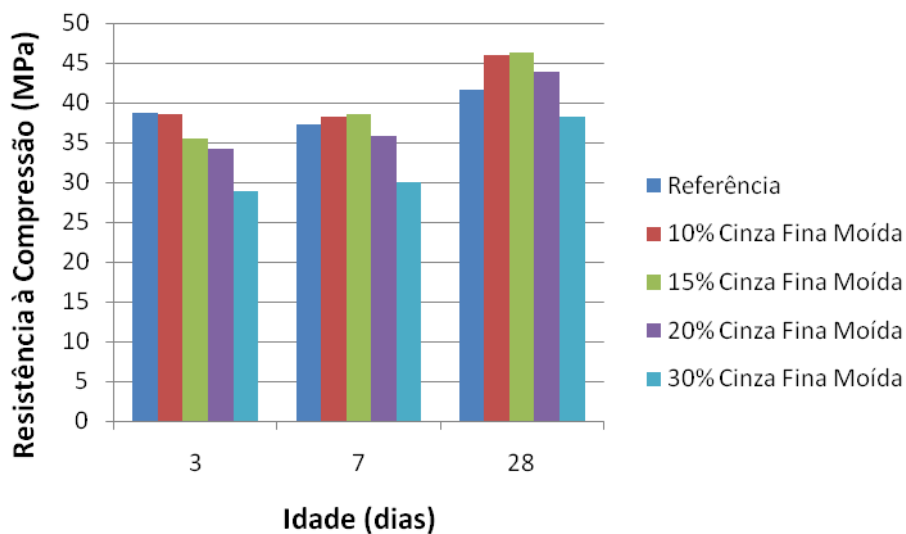


Figura 5.13 - Resistência à compressão em relação à idade dos corpos de prova confeccionados com cinza fina moída.

Considerando os desvios padrões das medidas verifica-se que:

- Os microconcretos com cinzas apresentam de forma geral um aumento da resistência à compressão com o tempo de cura a partir de 7 dias de cura;

- A taxa de crescimento da resistência é praticamente a mesma para os microconcretos com cinza, sendo maior que a do traço de referência;
- A adição de 30% de cinza fina conduz a resistências menores que a de referência em todas as idades;
- A adição de 20% de cinzas finas prejudica a resistência nas primeiras idades (3 e 7 dias), mas não afeta significativamente a resistência aos 28 dias;
- 15% de adição de cinzas finas não prejudica a resistência aos 3 dias e aumenta a resistência aos 28 dias em 11,5%, em relação à referência;
- 10% de cinzas finas não afetam a resistência nas idades de 3 e 7 dias e aumentam em 10,8% a resistência aos 28 dias, em relação à referência.

Uma vez que as cinzas foram adicionadas em volume equivalente, o que significa que foram utilizados menores massas de aglomerantes, pode-se considerar que a adição de 10 e 15% de cinzas finas é benéfica, no tocante à resistência à compressão. Quanto ao teor de 20%, é necessário um estudo que mantenha a massa clínquer/gesso/cinzas constante (cimento aditivado).

De forma similar aos dados das cinzas finas, os resultados de resistência à compressão para as cinzas grossas moídas são apresentadas na Figura 5.14, na Figura 5.15 e na Figura 5.16.

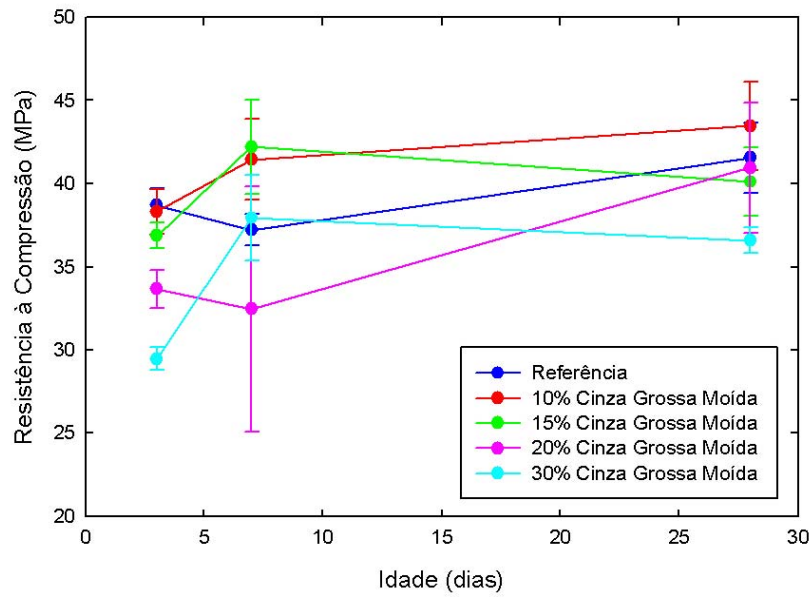


Figura 5.14 - Resistência à compressão em relação à idade dos corpos de prova confeccionados com cinza grossa moída, considerando o desvio padrão.

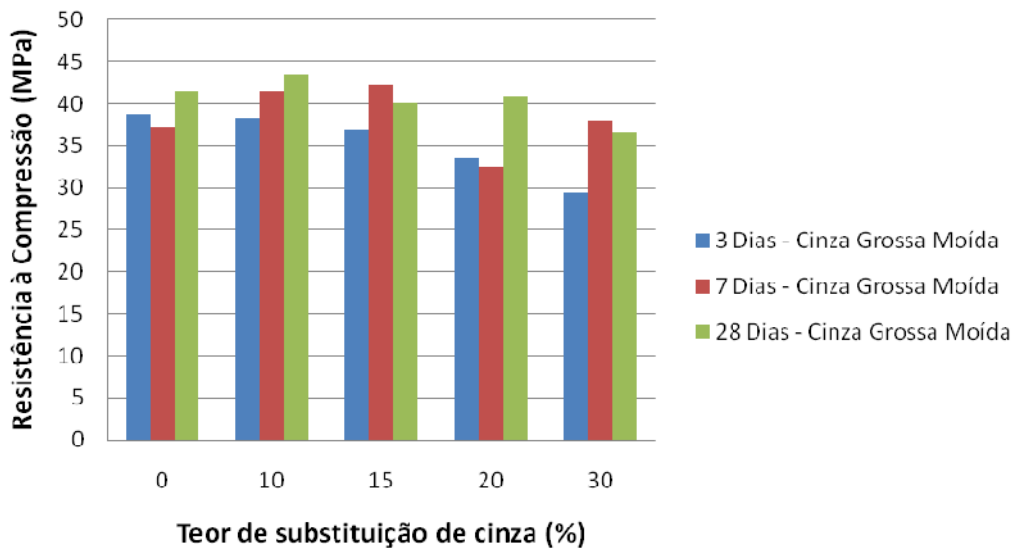


Figura 5.15 - Resistência à compressão em relação ao teor de substituição de cinza grossa moída.

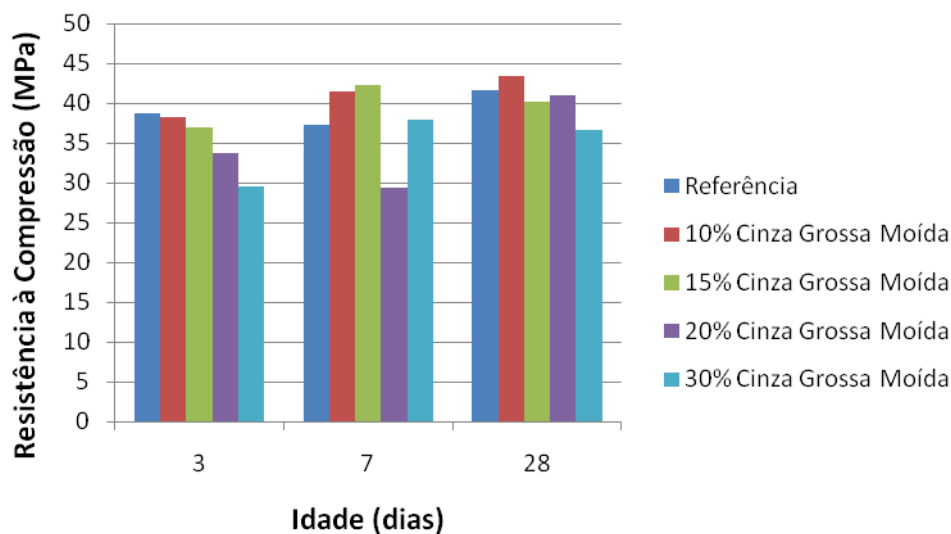


Figura 5.16 - Resistência à compressão em relação à idade dos corpos de prova confeccionados com cinza grossa moída.

Considerando os desvios padrões das medidas, verifica-se que:

- os microconcretos com cinzas grossas apresentam, de forma geral, um aumento gradual da resistência à compressão com o tempo de cura;
- existe uma diferença na taxa de crescimento da resistência entre os diferentes percentuais de substituição de cinzas nos microconcretos;
- a adição de 30% de cinza grossa conduz a resistências menores que a de referência nas idades de 3 e 28 dias, mas não altera significativamente a resistência aos 7 dias;
- a adição de 20% de cinza grossa prejudica a resistência nas primeiras idades, mas não afeta significativamente a resistência aos 28 dias. Além disso, na idade de 7 dias a resistência apresenta um alto desvio padrão, que pode ser consequência do processo de confecção dos corpos de prova;
- 15% de adição de cinza grossa prejudicam a resistência aos 3 dias, aumentam a resistência aos 7 dias em 13,4% em relação à referência e não afetam consideravelmente a resistência na idade de 28 dias;

- 10% de cinza grossa não afetam a resistência aos 3 dias de idades, aumentam em 11,4% a resistência aos 7 dias em relação à referência e praticamente não alteram a resistência aos 28 dias.

Uma vez que as cinzas foram adicionadas em volume equivalente, o que significa que foram utilizados menores massas de aglomerantes, pode-se considerar que as adições de 10 e 15% de cinzas grossas é benéfica, no tocante à resistência à compressão. Quanto ao teor de 20%, é necessário um estudo que mantenha a massa clínquer/gesso/cinzas constante (cimento aditivado).

A Figura 5.17 apresenta o comportamento das duas cinzas em relação ao teor de substituição, de onde podemos observar que:

- na idade de 3 dias, ambas as cinzas se comportam de forma equivalente quanto à resistência adquirida;
- aos 7 dias, a cinza grossa moída apresenta um valor de resistência maior que a cinza fina moída, exceto no teor de 20% de substituição, constatado anteriormente com alto desvio padrão;
- na idade de 28 dias, a cinza fina demonstra um ganho de resistência à compressão maior que a cinza grossa em todos os teores de substituição.

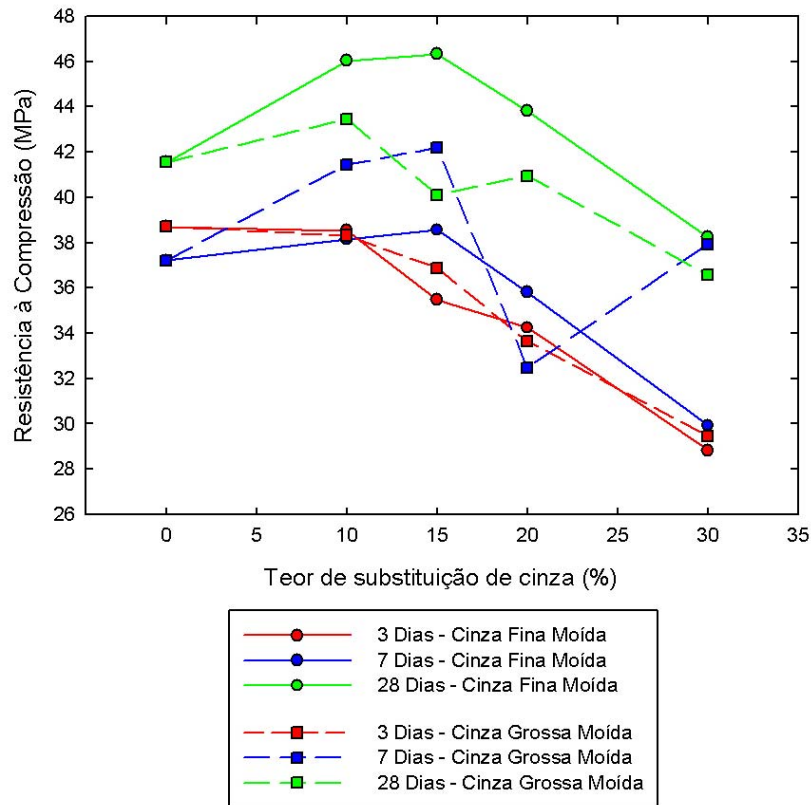


Figura 5.17 - Resistência à compressão em relação ao teor de substituição das cinzas.

### 5.10 Módulo de elasticidade

Os resultados de módulo de elasticidade para os corpos de prova confeccionados com e sem adição de cinzas grossas e finas moídas são apresentados na Figura 5.18.

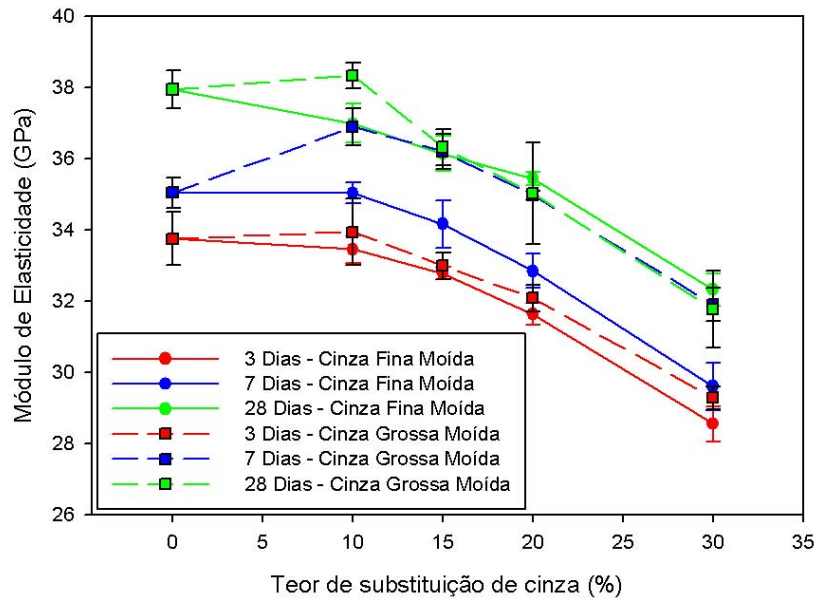


Figura 5.18 - Módulo de elasticidade em microconcretos confeccionados com diferentes teores de cinza de bagaço moídas (grossa e fina).

Considerando os desvios padrões das medidas, verifica-se que:

- verifica-se que o módulo de elasticidade apresenta a mesma tendência de evolução da resistência à compressão;
- os microconcretos apresentam um aumento gradual do módulo de elasticidade com a idade de cura;
- a diminuição do módulo de elasticidade é proporcional ao aumento de substituição de cinzas nos microconcretos;
- a adição de 30% de cinza conduz a módulos de elasticidade menores que o de referência em todas as idades;
- as adições de 15 e 20% de cinzas prejudicam o módulo de elasticidade em todas as idades;
- a adição de 10% de cinza não afeta o módulo de elasticidade nas idades de 3, 7 e 28 dias. Na idade de 7 dias, a substituição de 10% de cinza grossa moída conduz a um ganho de 5,3% no módulo de elasticidade.

Da mesma forma que a resistência à compressão, a adição de 10% de cinzas moídas não afeta o módulo de elasticidade.

## 5.11 Absorção de água

Os dados do ensaio de absorção de água dos microconcretos para as diferentes cinzas são apresentados conjuntamente na Figura 5.19. Considerando a imprecisão do ensaio e o fato de que o ensaio não foi realizado utilizando vácuo, os dados indicam que:

- a adição de 10, 15 e 20% da cinza grossa não afeta a permeabilidade dos compósitos.
- no caso das cinzas finas, a permeabilidade só não é afetada para as adições de 10 e 15%.
- a alta permeabilidade do compósito com 20% de cinza fina pode sugerir que houve algum problema no preparo dessas amostras.

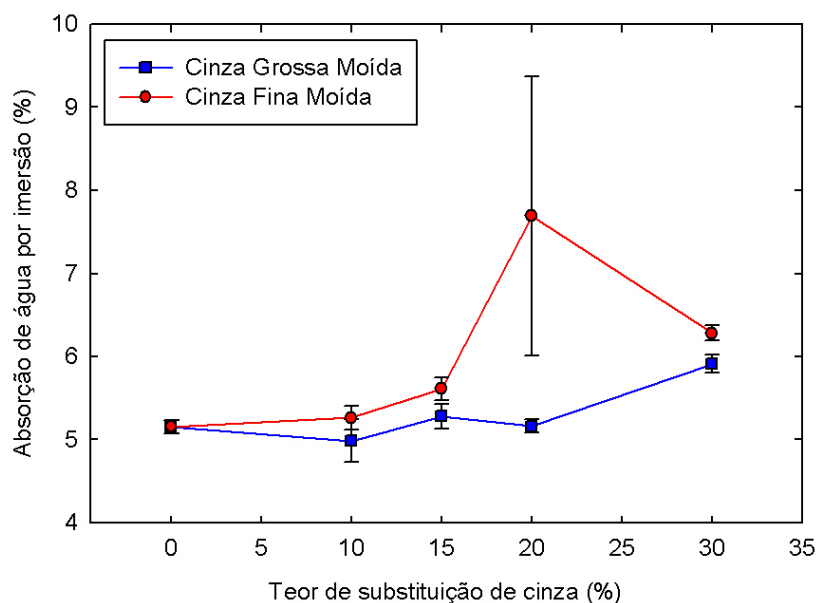


Figura 5.19 - Absorção de água por imersão em microconcretos confeccionados com cinza de bagaço de cana.



Era de se esperar que a adição de finos aumentasse a compacidade do compósito. No entanto isto não ocorreu de forma significativa. Resultados similares foram obtidos por Cordeiro, G. C. *et al.* (2006) no ensaio de absorção por capilaridade.

## 5.12 Considerações finais

Os resultados descritos acima considerados mais relevantes para a avaliação da influência das cinzas no desempenho de compósitos cimentícios são apresentados de forma sucinta na Tabela 5.8.

Tabela 5.8 - Principais resultados das cinzas estudadas (*in natura* e moída).

	<b>Cinza Grossa <i>in natura</i></b>	<b>Cinza Fina <i>in natura</i></b>	<b>Cinza Grossa Moída</b>	<b>Cinza Fina Moída</b>
IAP	não pozolânica	não pozolânica	pozolânica	pozolânica
Condutividade	sem atividade pozolânica	sem atividade pozolânica	atividade pozolânica moderada	atividade pozolânica moderada
Perda ao fogo	68,9%	20,9%	23,3%	23,3%
Blaine	-	-	1.112 m <sup>2</sup> /kg	1.195 m <sup>2</sup> /kg
Teor de SiO <sub>2</sub>	-	-	29,7%	71,0%
Difração de raios X	-	-	amorfa	cristalina
Resistência à compressão	-	-	10 e 15% de cinza	10 e 15% de cinza
Módulo de elasticidade	-	-	10 e 15% de cinza	10 e 15% de cinza
Absorção	-	-	10 e 15% de cinza	10 e 15% de cinza

## 6. CONCLUSÕES

Os resultados sugerem que as cinzas de bagaço de cana *in natura*, dependendo do local em que são coletadas, na peneira ou filtro, apresentam diferentes composições químicas, granulometria, rugosidade e grau de cristalinidade do arranjo atômico.

Através do ensaio de índice de atividade pozolânica (IAP), as cinzas, depois do processo de cominuição, podem ser consideradas pozolânicas em relação à norma NBR 12.653 (ABNT, 1992), uma vez que os corpos de prova que as incorporam apresentaram valores maiores que 75% da resistência da amostra de referência. Sendo assim, pode-se inferir que a moagem das cinzas *in natura* contribui para o ganho de resistência à compressão dos microconcretos, o que pode estar relacionado com a atividade pozolânica e/ou efeito *filler* das cinzas.

O ensaio de condutividade elétrica, proposto por Luxan *et al.* (1989), classificou as cinzas *in natura* como materiais sem atividade pozolânica. Após moídas, as cinzas melhoraram sua reatividade, sendo então consideradas como materiais de atividade pozolânica moderada. Assim como no ensaio de IAP, a condutividade reforça a importância da moagem na reatividade do resíduo.

Analisando conjuntamente os ensaios de perda ao fogo e espectrometria de fluorescência de raios X, verifica-se que a cinza grossa *in natura* apresentou maior teor de carbono e menor teor de sílica enquanto a cinza fina *in natura* apresentou menor porcentagem de carbono e maior porcentagem de sílica. As cinzas moídas apresentaram áreas de superfícies específicas (Blaine) similares e mesmo valor de perda ao fogo. Segundo critério da norma NBR 12.653 (ABNT, 1992), nenhuma das cinzas podem ser classificadas como pozolânicas em relação à perda ao fogo.

Através do ensaio de difração de raios X pode-se inferir que apenas a cinza fina moída apresenta o arranjo predominantemente cristalino, enquanto a cinza grossa moída teria o seu arranjo basicamente amorfo. A sílica está presente nas duas cinzas na forma de quartzo. Isto indicaria que a cinza fina seria menos reativa que a

cinza grossa, considerada uma mesma granulometria e uma mesma composição química.

Porém, independente do teor de sílica e de grau de cristalinidade nas cinzas, os microconcretos confeccionados com cinzas finas e grossas moídas apresentaram comportamento semelhante nos ensaios de resistência à compressão, módulo de elasticidade e absorção de água. Os melhores resultados alcançados entre todos os teores de substituição foram os encontrados com as substituições de 10 e 15%. O mecanismo de atuação das cinzas parece estar relacionado ao preenchimento de vazios (efeito *filler*).

## 7. SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Para trabalhos futuros relacionados a este estudo são sugeridos os seguintes tópicos:

- análise da influência da adição de cinza de bagaço de cana-de-açúcar em corpos de prova de concreto;
- análise da durabilidade de argamassas e concretos confeccionados com substituição parcial segundo a sua resistência à carbonatação, reação álcali-agregado e penetração de íons cloreto;
- comparação entre cinzas produzidas em diferentes usinas sucroalcooleiras;
- influência do tipo de cana e solo de cultivo nas características físicas da cinza gerada no processo de combustão.
- estudo da influência da finura das partículas de cinza de bagaço de cana no fator água/cimento e na resistência à compressão.

## 8. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ANEEL - Agência Nacional de Energia Elétrica. Atlas de energia elétrica do Brasil. 3. ed. Brasília: ANEEL, 2008.

ANEEL - Agência Nacional de Energia Elétrica. Atlas de energia elétrica do Brasil. 2. ed. Brasília: ANEEL, 2005.

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas (1991). Cimento Portland comum: NBR 5.732. Rio de Janeiro.

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas (1991). Cimento Portland de alta resistência inicial: NBR 5.733. Rio de Janeiro.

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas (1991). Cimento Portland de alto-forno: NBR 5.735. Rio de Janeiro.

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas (1991). Cimento Portland pozolânico: NBR 5.736. Rio de Janeiro.

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas (1992). Cimento Portland resistentes a sulfatos: NBR 5.737. Rio de Janeiro.

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas (1992). Materiais pozolânicos – determinação de atividade pozolânica com cimento Portland – índice de atividade pozolânica com cimento: NBR 5.752. Rio de Janeiro.

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas (1982). Areia normal para ensaio de cimento: NBR 7.214. Rio de Janeiro.

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas (1996). Cimento Portland – Determinação da resistência à compressão: NBR 7.215. Rio de Janeiro.

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas (1985). Cimento Portland e outros materiais em pó – determinação da finura por meio da peneira 0,044 mm (nº 325): NBR 9.202. Rio de Janeiro.

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas (2005) Versão 2006. Argamassa e concreto endurecidos – Determinação da absorção de água, índice de vazios e massa específica: NBR 9.778.

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas (1991). Cimento Portland Composto: NBR 11.578. Rio de Janeiro.

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas (1991). Cimento Portland – Determinação da finura por meio da peneira 75 µm (nº 200): NBR 11.579. Rio de Janeiro.

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas (1992). Aditivos para concreto de cimento Portland: NBR 11.768. Rio de Janeiro.

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas (1992). Materiais pozolânicos: NBR 12.653. Rio de Janeiro.

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas (2004). Cimento Portland – Análise química - Determinação de perda ao fogo – método de ensaio: NBR NM 18. Rio de Janeiro.

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas (2000). Cimento Portland e outros materiais em pó – determinação da massa específica: NBR NM 23. Rio de Janeiro.

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

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas (2001). Agregados - Determinação da composição granulométrica: NBR NM 248. Rio de Janeiro.

- AGGARWAL, L. K. Bagasse-reinforced cement composites. *Cement and Concrete Composites* 17, p. 107 – 112, Elsevier, 1995.
- AKASAKI, J. L.; SILVA, E. J.; TASHIMA, M. M.; BARBOSA, M. B. Influência da adição de cinza de casca de arroz nos tempos de pega e retração por secagem. UNESP, Ilha Solteira/SP, p. 25 - 32, 2005.
- AKRAM, T.; MEMON, S. A.; OBAID, H. Production of low cost self compacting concrete using bagasse ash. *Science Direct, Elsevier. Construction and Building Materials* 23, p. 703 - 712, 2009.
- ANJOS, M. A. S.; MOREIRA, H. P.; BORJA, E. V.; PEREIRA, A. C.; NETO, C. A. Efeito da adição de cinza da biomassa da cana-de-açúcar como finos no concreto auto-adensável. *Anais do 52º Congresso Brasileiro do Concreto. IBRACON*, 2010.
- BELMONTE, E. P. Espectrometria por fluorescência de raios X por reflexão total: um estudo simulado utilizando o método de Monte Carlo. Tese de D.Sc., Universidade Federal do Rio de Janeiro, COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro/RJ, 164 p, 2005.
- BILBA, K.; ARSÈNE, M. A.; OUENSANGA, A. Sugar cane bagasse fibre reinforced cement composites. Part I. Influence of the botanical components of bagasse on the setting of bagasse/cement composite. *Cement e Concrete Composites* 25, Elsevier Science, p. 91 - 96, 2003.
- BILBA, K.; ARSÈNE, M. A. Silane treatment of bagasse fiber for reinforcement of cementitious composites. *Composites: Part A* 39, p. 1488 – 1495. Elsevier, 2008.
- BORGES, J. M. M.; ARBEX, J. G. Cana-de-açúcar e energia. SBPE - Sociedade Brasileira de Planejamento Energético, *Revista Brasileira de Energia*, Vol. 3, No 2, 1994.
- BORLINI, M. C.; MENDONÇA, J. L. C. C.; PINATTI, D. G.; CONTE, R. A.; VIEIRA, C. M. F.; MONTEIRO, S. N. Cerâmica com cinza de bagaço de cana-de-

- açúcar: avaliação da influência da cinza e da sua granulometria nas propriedades físicas e mecânicas. Anais do 17º Congresso Brasileiro de Engenharia e Ciência dos Materiais, p 2033-2041. CBECIMat, Foz do Iguaçu, PR. 15 a 19 de Novembro, 2006.
- CALLISTER, W. D. Jr. Fundamentos da Ciência e Engenharia de Materiais. 2. ed. Rio de Janeiro: LCT, 2006.
- CAO, Y.; SHIBATA, S.; FUKUMOTO, I. Mechanical properties of biodegradable composites reinforced with bagasse fibre before and after alkali treatments. Science Direct, Elsevier. Composites: Part A 37, p. 423 - 429, 2005.
- CASTALDELLI, V. N.; CASTRO, J. N. T.; QUEVEDO, V. R. B.; AKASAKI, J. L.; TASHIMA, M. M.; BERNABEU, J. J. P. Avaliação da cinza do bagaço da cana-de-açúcar (*in natura*) quando adicionado ao concreto. Anais do 52º Congresso Brasileiro do Concreto. IBRACON, 2010.
- CASTRO, A. L. Aplicação dos conceitos reológicos na tecnologia de concretos de alto desempenho. Tese de D.Sc., Ciências e Engenharia de Materiais, Universidade de São Paulo, São Paulo/SP, 302 p, 2007.
- CASTRO, J. B.; BONELLI, P. R.; CERRELLA, E. G.; CUKIERMAN, A. L. Phosphoric acid activation of agricultural residues and bagasse from sugar cane: influence of the experimental conditions on adsorption characteristics of activated carbons. Ind. Eng. Chem. Res., Vol. 39, No. 11, p 4166-4172, 2000.
- CIMENTO ITAMBÉ. Aditivo ou adição. Disponível no site <<http://www.cimentoitambe.com.br/massa-cinzenta/aditivo-ou-adicao/>>, consultado em 29/07/2009.
- COELHO, S. T., JUNIOR, S. O., ZYLBERSZTAJN, D. Thermoeconomic analysis of eletricity cogeneration from sugarcane origin. Third Biomass Conference of the Americas. Elsevier Science Ltd. Vol. II – PP 1631-1640. Montreal, 24 a 29 de Agosto de 1997.



- COELHO, S. T., ZYLBERSZTAJN, D. Barreiras e mecanismos de implementação à co-geração de eletricidade a partir de biomassa. III Congresso Brasileiro de Planejamento Energético. São Paulo/SP, 1998a.
- COELHO, S. T., BOLOGNINI, M. F., ZYLBERSZTAJN, D. Policies to improve biomass-electricity generation in Brazil. The World Renewable Energy Congress V – Elsevier Publ. RENE Vol. 16, Iss. 4, PP 996-999, Ms. 810, 19-25 September, 1998b.
- COELHO, S. T. Mecanismos para implementação da cogeração de eletricidade a partir de biomassa. Um modelo para o Estado de São Paulo. Tese de D.Sc., Universidade de São Paulo, São Paulo/SP, 200 p, 1999.
- CORDEIRO, G. C. Utilização de cinzas ultrafinas do bagaço de cana-de-açúcar e da casca de arroz como aditivos minerais em concreto. Tese (Doutorado em Ciências em Engenharia Civil). Rio de Janeiro: Universidade Federal do Rio de Janeiro, COPPE, 2006.
- CORDEIRO, G. C.; FILHO, R. D. T.; FAIRBAIRN, E. M. R.; TAVARES, L. M. M. Estudo do processo de moagem da cinza do bagaço da cana-de-açúcar visando seu emprego como aditivo mineral para concreto. Conferência Brasileira de Materiais e Tecnologias Não-Convencionais: Habitações e Infra-Estrutura de Interesse Social. NOCMAT, Pirassununga, São Paulo, 2004.
- CORDEIRO, G. C.; FILHO, R. D. T.; FAIRBAIRN, E. M. R. Concreto de alto desempenho com cinza ultrafina do bagaço de cana-de-açúcar. Anais do 48º Congresso Brasileiro do Concreto. IBRACON, 2006.
- CORDEIRO, G. C.; FILHO, R. D. T.; TAVARES, L. M.; FAIRBAIRN, E. M. R. Pozzolanic activity and *filler* effect of sugar cane bagasse ash in Portland cement and lime mortars. Cement and Concrete Composites 30, p. 410 – 418, Elsevier, 2008.
- CORDEIRO, G. C.; FILHO, R. D. T.; FAIRBAIRN, E. M. R. Avaliação físico-mecânica de concretos com cinzas pozolânicas expostos por longo tempo à solução de  $MgSO_4$ . Anais do 51º Congresso Brasileiro do Concreto. IBRACON, 2009a.

- CORDEIRO, G. C.; FILHO, R. D. T.; TAVARES, L. M.; FAIRBAIRN, E. M. R. Ultrafine grinding of sugar cane bagasse ash for application as pozzolanic admixture in concrete. *Cement and Concrete Research* 39 , p. 110 – 115, Elsevier, 2009b.
- CORDEIRO, G. C.; FILHO, R. D. T.; FAIRBAIRN, E. M. R. Effect of calcination temperature on the pozzolanic activity of sugar cane bagasse ash. *Construction and Building Materials* 23 , p. 3301 – 3303, Elsevier, 2009c.
- CORDEIRO, G. C.; RANGEL, R. C. N.; BARROSO, T. R. Avaliação da resistência à compressão, da compacidade e da retração por secagem de argamassas com cinza do bagaço de cana-de-açúcar com elevado teor de carbono. *Anais do 52º Congresso Brasileiro do Concreto*. IBRACON, 2010.
- CORDEIRO, L. N. P. Análise da variação do índice de amorfismo da cinza de casca de arroz sobre a atividade pozolânica. *Dissertação (Mestrado em Engenharia)*. Porto Alegre: Universidade Federal do Rio Grande do Sul, UFRGS, 2009.
- CORTEZ, L.; MAGALHÃES, P.; HAPPI, J. Principais subprodutos da agroindústria canieira e sua valorização. *SBPE – Sociedade Brasileira de Planejamento Energético – Revista Brasileira de Energia*, Vol. 2 - nº 2, 1992.
- COUTINHO, J. S. Cinza de casca de arroz (RHA) industrial - ensaios. *International Conference on Non-Convencional Materials and Technologies: Ecological Materials and Technologies for Sustainable Building – NOCMAT*, Maceió/AL, 2007.
- CNS Eletronics. *Erudite MKII resonant frequency test system – operating manual*. Science C.N.S. Eletronics, May 1995.
- DASSAN, K. R. F. O.; FORMAGINI, S.; DASSAN, D. Produção de blocos de concreto com cinzas de bagaço de cana-de-açúcar. *Anais do 52º Congresso Brasileiro do Concreto*. IBRACON, 2010.
- DUXSON, P.; PROVIS, J. Low CO<sub>2</sub> concrete: are we making any progress? *BEDP Environment Design Guide*. PRO 24, November 2008.

ESTADO DE MINAS. Energia – ligados no bagaço da cana. Economia, p.10, segunda-feira, 15 de Novembro de 2010.

FAIRBAIRN, E. M. R.; AMERICANO, B. B.; CORDEIRO, G. C.; PAULA, T. P.; FILHO, R. D. T.; SILVOSO, M. M. Cement replacement by sugar cane bagasse ash: CO<sub>2</sub> emissions reduction and potencial for carbon credits. Journal of Environmental Management 91, p. 1864 – 1871, Elsevier, 2010.

FAPESP - FUNDAÇÃO DE AMPARO À PESQUISA DO ESTADO DE SÃO PAULO. Bagaço de qualidade. Fábio Raynol, da Agência FAPESP. Revista FAPESP, edição impressa 167, Janeiro/2010. Disponível no site <<http://revistapesquisa.fapesp.br/?art=4036ebd=1epg=1elg=>>>, consultado em 10/08/2010a.

FAPESP - FUNDAÇÃO DE AMPARO À PESQUISA DO ESTADO DE SÃO PAULO. Concreto feito de cinzas. Yuri Vasconcelos. Revista FAPESP, edição impressa 171, Maio/2010. Disponível no site <<http://revistapesquisa.fapesp.br/?art=4130ebd=1epg=1elg=>>>, consultado em 10/08/2010b.

FAPESP - FUNDAÇÃO DE AMPARO À PESQUISA DO ESTADO DE SÃO PAULO. Cinzas de valor. Yuri Vasconcelos. Revista FAPESP, edição impressa 174, Agosto/2010. Disponível no site <<http://revistapesquisa.fapesp.br/?art=4208ebd=1epg=1elg=>>>, consultado em 10/08/2010c.

FENG, Q.; YAMAMICHI, H.; SHOYA, M.; SUGITA, S. Study on the pozzolanic properties of rice husk ash by hydrochloric acid pretreatment. Cement and Concrete Research 34, p. 521 – 526, Pergamon, 2004a.

FENG, Q.; LIN, Q.; YU, Q.; ZHAO, S.; YANG, L.; SUGITA, S. Concrete with highly active husk ash. Journal of Wuhan University of Technology – Mater. Sci. Ed. Vol. 19, N. 3, p. 74 – 77. Set /2004b.

FIESP/CIESP. Ampliação da oferta de energia através da biomassa (bagaço da cana-de-açúcar), São Paulo: FIESP/CIESP, 90 p, 2001.

- FIGUEIREDO, E. B.; PANOSSO, A. R.; ROMÃO, R.; SCALA JR., N. L. G. Greenhouse gas emission associated with sugar production in southern Brazil. Carbon Balance and Management, 2010.
- FREIRE, W. J.; BERALDO, A. L. Tecnologia e materiais alternativas de construção. Editora da UNICAMP, cap. 6, p. 145-190. Campinas, 2010.
- FREITAS, E. S. Caracterização da cinza do bagaço da cana-de-açúcar do município de Campos dos Goytacazes para uso na construção civil. Dissertação, Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro - UENF, Campo dos Goytacazes/RJ, 2005.
- GANESAN, K.; RAJAGOPAL, K.; THANGAVEL, K. Evaluation of bagasse ash as corrosion resisting admixture for carbon steel in concrete. Anti-corrosion Methods and Materials. Vol. 54, N. 4, p 230-236. Karaikudi, India, 2007a.
- GANESAN, K.; RAJAGOPAL, K.; THANGAVEL, K. Evaluation of bagasse ash as supplementary cementitious material. Cement and Concrete Composites 29, p. 515 – 524, Elsevier, 2007b.
- GARTNER, E. M. Industrially interesting approaches to low-CO<sub>2</sub> cements. Cement and Concrete Research, v.34, n. 9, p. 1489-1498, 2004.
- GOLDEMBERG, J.; LUCON, O. Energias renováveis: um futuro sustentável. Revista USP, n. 72, p. 6-15, São Paulo/SP, 2007.
- GUPTA, V. K.; MOHAN, D.; SHARMA, S.; PARK, K. T. Removal of chromium (VI) from electroplating industry wastewater using bagasse fly ash – a sugar industry waste material. Kluwer Academic Publishers, Boston. Manufactured in the Netherlands, 1999.
- GUPTA, V. K.; SHARMA, S. Removal of zinc from aqueous solutions using bagasse fly ash – a low cost adsorbent. Department of Chemistry, Indian Institute of Technology, Roorkee, Roorkee 247667 (U.A.), India. Ind. Eng. Chem. Res., Vol. 42, No. 25, p 6619-6624, 2003.

IBGE - INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. Disponível no site <<http://www.ibge.gov.br>>, 2005.

IBGE - INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. Disponível no site <<http://www.ibge.gov.br/home/estatistica/indicadores/agropecuaria/lspa/default.shtm>>, consultado em 23/02/2010.

ISAIA, G. C. Efeitos da mistura binária e termária de pozolanas em concreto de elevado desempenho: um estudo de durabilidade com vistas à corrosão da armadura. Tese (Doutorado em Ciências em Engenharia Civil). São Paulo: Escola Politécnica, Universidade de São Paulo. São Paulo, 1995.

ISAIA, G. C. Materiais de construção civil e princípios de ciência e engenharia de materiais. 2 ed., 1v., São Paulo, IBRACON, 2010.

JARDIM, A. Bioeletricidade: a energia que vem da nossa terra. SBPE - Sociedade Brasileira de Planejamento Energético, Revista Brasileira de Energia, Vol. 13, No 2, p. 9-18, 2º sem., 2007.

KAWABATA, C. Y. Aproveitamento de cinzas da queima de resíduos agroindustriais na produção de compósitos fibrosos e concreto leve para a construção rural. Tese (Doutorado em Zootecnia e Engenharia de Alimentos). São Paulo: Universidade de São Paulo, Pirassununga, 2008.

LASKAR, A. I.; TALUKDAR, S. Rheological behavior of high performance concrete with mineral admixtures and their blending. Science Direct, Elsevier. Construction and Building Materials 22, p. 2345 - 2354, 2008.

LATAYE, D. H.; MISHRA, I. M.; MALL, I. D. Removal of pyridine from aqueous solution by adsorption on bagasse fly ash. Department of Chemical Engineering, Indian Institute of Technology, Roorkee 247667, India. Ind. Eng. Chem. Res., Vol. 45, No. 11, p 3934-3943, 2006.

LATAYE, D. H.; MISHRA, I. M.; MALL, I. D. Multicomponent sorptive removal of toxics Pyridine, 2-Picoline, and 4-Picoline from aqueous solution by bagasse fly

- ash: optimization of process parameters. Department of Civil Engineering, Visvesvaraya National Institute of Technology – Nagpur 440010, and Department of Chemical Engineering, Indian Institute of Technology – Roorkee 247667, India. *Ind. Eng. Chem. Res.*, Vol. 47, No. 15, p 5629-5635, 2008.
- LIMA, C. C. Caracterização química de resíduos da produção de biodiesel compostados com adição mineral. Tese (Doutorado em Solos e Nutrição de Plantas). Universidade Federal de Viçosa. Viçosa, Minas Gerais, 2006.
- LIMA, S. A.; SALES, A.; SANTOS, T. J. Caracterização físico-química da cinza do bagaço da cana-de-açúcar visando o seu uso em argamassas e concretos como substituto do agregado miúdo. *Anais do 51º Congresso Brasileiro do Concreto. IBRACON*, 2009.
- LUXAN, M. P.; MADRUGA, F.; SAAVEDRA, J. Rapide evaluation of pozzolanic activity of natural products by conductivity measurement. *Cement and Concrete Research* 19, p. 63 – 68, Pergamon, 1989.
- MACEDO, I. C. Geração de energia elétrica a partir de biomassa no Brasil: situação atual, oportunidades e desenvolvimento. CGEE (Centro de Gestão e Estudos Estratégicos – Ciência, Tecnologia e Inovação). CTEneg – Secretaria Técnica do Fundo Setorial de Energia, junho de 2001.
- MACEDO, I. C.; CARVALHO, E. P. A energia da cana-de-açúcar – Doze estudos sobre a agroindústria da cana-de-açúcar no Brasil e a sua sustentabilidade - Relatório Unica. UNICA: União da Indústria de Cana-de-açúcar. São Paulo, 2005.
- MACEDO, I. C. GHG emissions in the production and use of ethanol from sugarcane in Brazil – the expansion since 2002, LUC, ILUC effects: some data and discussion. NIPE, UNICAMP, October, 2008.
- MACEDO, P. C. Avaliação do desempenho de argamassas com adição de cinza do bagaço de cana-de-açúcar. Dissertação, Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”, UNESP, Ilha Solteira/SP, 2009a.

- MACEDO, P. C.; CASTALDELLI, V. N.; AKASAKI, J. L.; MELGES, J. L. P.; FIORITI, C. F.; TASHIMA, M. M.; BERNABEU, J. J. P. Revisão bibliográfica sobre o uso de cinza de bagaço de cana-de-açúcar na construção civil – Anais do 51º Congresso Brasileiro do Concreto. IBRACON, 2009b.
- MALHOTRA, V. M. Making concrete greener with fly ash. *Concrete International*, v.21, n.5, pp. 61-66, 1999.
- MALHOTRA, V. M. Introduction: sustainable development and concrete technology. *Concrete International*, v.24, n.7, pp. 22, 2002.
- MANSANEIRA, E. C. Verificação da potencialidade do uso da cinza do bagaço da cana-de-açúcar em cimento Portland. Dissertação, Universidade Estadual de Londrina, Londrina/PR, 2010.
- MAPA – MINISTÉRIO DA AGRICULTURA, PECUÁRIA E ABASTECIMENTO. Zoneamento Agroecológico da cana-de-açúcar, 2009.
- MARTINERA HERNÁNDEZ, J. F.; MIDDENDORF, B.; GEHRKE, M.; BUDELMANN, H. Use of waste of the sugar industry as pozzolana in lime-pozzolana binders: study of the reaction. *Cement and Concrete Research* 28, n. 11, p. 1525 – 1536. Pergamon, 1998.
- MARTINERA HERNÁNDEZ, J. F.; BETANCOURT RODRÍGUEZ, S.; MIDDENDORF, B.; RUBIO, A.; MARTÍNEZ FERNÁNDEZ, L. MACHADO LÓPEZ, I.; GONZÁLEZ LÓPEZ, R. Propiedades puzolánicas de desechos de La industria azucarera (primeira parte). *Materiales de Construcción*, v.50, n.260, p. 71-78, 2000.
- MARTINS, C. M.; ZANELLA, R. M. Avaliação da absorção por capilaridade em argamassas produzidas com cinza do bagaço de cana-de-açúcar – Anais do 51º Congresso Brasileiro do Concreto. IBRACON, 2009.
- MEHTA, P. K. e MONTEIRO, P. J. M. *Concreto: Microestrutura, Propriedades e Materiais*. 3. ed. São Paulo: IBRACON, 2008.

- MEHTA, P. K. Greening of the concrete industry for sustainable development. Concrete international, v. 24, n. 7, pp. 23-28, 2002.
- MENDES, G. Aditivos e adições. Revista Construção Mercado n. 62, 2006. Disponível no site < <http://revista.construcaomercado.com.br/negocios-incorporacao-construcao/62/aditivos-e-adicoes-desempenho-aditivado-121409-1.asp>>, consultado em 20/07/2009.
- MME - MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA. Balanço Energético Nacional – Ano base 2007 (BEN 2008). Disponível no site <[http://www.mme.gov.br/mme/menu/todas\\_publicacoes.html](http://www.mme.gov.br/mme/menu/todas_publicacoes.html)>, consultado em 03/03/2010.
- MME - MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA. Resenha Energética Brasileira – Exercício de 2008 (preliminar). Abril de 2009. Disponível no site < <http://www.mme.gov.br/mme/galerias/arquivos/publicacoes/BEN>>, consultado em 03/03/2010.
- MONTEIRO, S. N.; RODRIQUEZ, R. J. S.; SOUZA, M. V. Sugar cane bagasse waste as reinforcement in low cost composites. Advanced Performance Materials 5, p. 183 – 191. Kluwer Academic Publishers, Manufactured in the Netherlands, 1998.
- MOREIRA, J. R.; GOLDEMBERG, J. The alcohol program. Energy Policy, v.27, n. 4, pp. 229-245, 1999.
- NEHDI, M.; DUQUETTE, J.; EL DAMATTY, A. Performance of rice husk ash produced using a new technology as a mineral admixture in concrete. Science Direct, Pergamon. Cement and Concrete Research 33, p. 1203 - 1210, 2003.
- NEVILLE, A. M. Cements of different types. Science Direct, Pergamon. Cement and Concrete Research 33, p. 1203 - 1210, 2003.
- NEVILLE, A. M. Propriedades do concreto. Editora Pini, 2 ed., São Paulo: 1997.



- NIEBEL, P.; SANTI, M. R.; GARCIA, M.; WOZNIAK, R.; FREITAS, C.; CAMPITELI, V. Influência de adições minerais na trabalhabilidade, porosidade e resistência à compressão axial no concreto. Anais do 5º Congresso Internacional sobre Patologia e Reabilitação de Estruturas. CINPAR, 2009.
- NUNES, I. H. S.; VANDERLEI, R. D.; SECCHI, M.; ABE, M. A. P. Estudo das características físicas e químicas da cinza do bagaço de cana-de-açúcar para uso na construção – Revista Tecnológica, v.17, p. 39-48, 2008.
- ONÉSIPPE, C.; PASSE-COUTRIN, N.; TORO, F.; DELVASTO, S.; BILBA, K.; ARSÈNE, M. A. Sugar cane bagasse fibres reinforced cement composites: thermal considerations. Contents lists available at Science Direct, Elsevier. Composites: Part A 41, p. 549 - 556, 2010.
- PAULA, M. O. Potencial da cinza do bagaço de cana-de-açúcar como material de substituição parcial de cimento Portland. Dissertação – Mestrado em Engenharia Agrícola. Universidade Federal de Viçosa, Viçosa/ MG, Brasil, 77 p, 2006.
- PAULA, M. O.; TINÔCO, I. F. F.; RODRIGUES, C. S.; SILVA, E. N.; SOUZA, C. F. Potencial da cinza do bagaço da cana-de-açúcar como material de substituição parcial de cimento Portland. Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental, v. 13, n. 3, p. 353-357, Campina Grande – PB, 2009.
- PAYÁ, J.; MONZÓ, J.; BORRACHERO, M. V.; MELLADO, A.; ORDOÑEZ, L. M. Determination of amorphous silica in rice husk ash by a rapid analytical method. Cement and Concrete Research 31, p. 227 – 231, Pergamon, 2001.
- PAYÁ, J.; MONZÓ, J.; BORRACHERO, M. V.; DÍAZ-PNZÓN, L.; ORDOÑEZ, L. M. Sugar-cane bagasse ash (SCBA): studies in its properties for reusing in concrete production. Journal of Chemical Technology and Biotechnology, Oxford, n 77, p. 321-325, 2002.
- PEDROSO, C. M.; VANDERLEI, R. D.; NUNES, I. H. S.; SOUTO, J. M. F. Estudo do comportamento reológico da pasta de cimento com adição de cinza de bagaço

- da cana-de-açúcar e aditivo químico superplastificante - Anais do 51º Congresso Brasileiro do Concreto. IBRACON, 2009.
- PELLEGRINI, M. C. Inserção de centrais co-geradoras a bagaço de cana no parque energético do Estado de São Paulo: exemplo de aplicação de metodologia para análise dos aspectos locacionais e de integração energética. Dissertação M.Sc., Universidade de São Paulo, São Paulo, SP, Brasil, 178 p, 2002.
- PORTAL MINAS-GERAIS.NET. Disponível no site <<http://www.minas-gerais.net>>, consultado em 13/09/2010.
- POSSES, I. P.; DIAS, K. S. P.; TRISTÃO, F. A.; CALMON, J. L. Potencial de geração de cinza de bagaço de cana-de-açúcar no estado do Espírito Santo. Anais do 52º Congresso Brasileiro do Concreto. IBRACON, 2010.
- POUEY, M. T.; DAL MOLIN, D. C. C. Curvas de comportamento da atividade pozolânica de cinzas de casca de arroz com diferentes composições mineralógicas. Anais do 52º Congresso Brasileiro do Concreto. IBRACON, 2010.
- QUINTERO-RAMIREZ, R. Hidrólise da biomassa lignocelulósica. Bioetanol de cana-de-açúcar – PeD para produtividade e sustentabilidade. Coordenador: Luís Augusto Barbosa Cortez. Editora Blusher. Parte 4, cap. 13, p. 717-731, 2010.
- REAL, C.; ALCALÁ, M. D.; CRIADO, J. M. Preparation of sílica from Rice husks. J. Am. Ceram. Soc., 79 (8), p. 2012-2016, 1996.
- RODRIGUES, C. S. Efeito da adição da cinza da casca de arroz no comportamento de compósitos cimentícios reforçados por polpa de bambu. Tese de doutorado, Engenharia Civil PUC, Rio de Janeiro, 2004.
- RODRIGUES, M. S. Caracterização de cinza residual da queima de casca de arroz para a produção de argamassa. Dissertação – Mestrado em Engenharia Agrícola. Faculdade de Engenharia Agrícola, Universidade de Estadual de Campinas. UNICAMP, 115 p., 2008.

- SALES, A.; LIMA, S. A.; SANTOS, T. J.; CORDEIRO, S. G. F.; CERRALIO, B. S. Argamassas confeccionadas com a cinza do bagaço da cana-de-açúcar em substituição ao cimento Portland: influência do tipo de queima do bagaço. Anais do 52º Congresso Brasileiro do Concreto. IBRACON, 2010.
- SARMIENTO, C. R.; FREIRE, W. J. Argamassa de cimento e areia combinada com fibras de bagaço de cana-de-açúcar. Eng. Agríc., Jaboticabal, v.17, n.2, p.1-8, dez. 1997.
- SINGH, N. B.; SINGH, V. D.; RAI, S. Hydration of bagasse ash-blended Portland cement. Cement and Concrete Research 30, p. 1485 – 1488, Pergamon, 2000.
- SOUSA, L. R. L.; FIGUEIREDO, E. P.; RÊGO, J. H. S. Caracterização de cinzas do bagaço de cana-de-açúcar (CBC) residuais produzidas no estado de Goiás como adição mineral ao cimento - Anais do 51º Congresso Brasileiro do Concreto. IBRACON, 2009.
- SOUSA, L. R. L.; FIGUEIREDO, E. P.; RÊGO, J. H. S. Caracterização de compósitos de cimento com substituição de cinzas de bagaço de cana-de-açúcar (CBC) em diferentes teores. Anais do 52º Congresso Brasileiro do Concreto. IBRACON, 2010.
- SOUZA, G. N.; FORMAGINI, S.; CUSTÓDIO, F. O.; SILVEIRA, M. M. Desenvolvimento de argamassas com substituição parcial do cimento Portland por cinzas residuais do bagaço de cana-de-açúcar - Anais do 49º Congresso Brasileiro do Concreto. IBRACON, 2007a.
- SOUZA, J.; BEZERRA, I. M. T.; NEVES, G. A.; FERREIRA, H. C.; CARVALHO, J. B. Q.; OLIVEIRA, N. M. S.; SOUZA, A. J. D. Avaliação de argamassas com cinza e casca de arroz. Anais do 51º Congresso Brasileiro de Cerâmica. Salvador, 2007b.
- SOUZA, Z. J. A co-geração de energia no setor sucroalcooleiro: desenvolvimento e situação atual. Universidade Federal de São Carlos, Ribeirão Preto/SP, 2001.

- SRIVASTAVA, V. C.; MALL, I. D.; MISHRA, I. M. Multicomponent adsorption study of metal ions onto bagasse fly ash using Taguchi's design of experimental methodology. Department of Chemical Engineering, Indian Institute of Technology Roorkee – Roorkee 247667, India. Ind. Eng. Chem. Res., Vol. 46, No. 17, p 5697-5706, 2007.
- SRIVASTAVA, V. C.; PRASAD, B.; MISHRA, I. M.; MALL, I. D.; SWAMY, M. M. Prediction of breakthrough curves for sorptive removal of phenol by bagasse fly ash packed bed. Department of Chemical Engineering, Indian Institute of Technology Roorkee – Roorkee 247667, India. Ind. Eng. Chem. Res., Vol. 47, No. 5, p 1603-1613, 2008.
- TASHIMA, M. M. Cinza de casca de arroz altamente reativa: método de produção, caracterização físico-química e comportamento em matrizes de cimento Portland. Dissertação – Mestrado em Engenharia Civil. Universidade Estadual Paulista, UNESP, Ilha Solteira, 81 p., 2006.
- TIBONI, R. Utilização da cinza de casca de arroz de termoelétrica como componente do aglomerante de compósitos à base de cimento Portland. Dissertação – Mestrado em Engenharia Civil. Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Paulo, 179 p., 2007.
- UNICA - UNIÃO DA INDÚSTRIA DE CANA-DE-AÇÚCAR. Etanol e Bioeletricidade: a cana-de-açúcar no futuro da matriz energética. Coordenação e Organização: Eduardo L. Leão de Sousa e Isaías de Carvalho Macedo. 315 p., São Paulo, Luc Projetos de Comunicação, 2010a.
- UNICA - UNIÃO DA INDÚSTRIA DE CANA-DE-AÇÚCAR. Bioplástico de etanol da Coca-Cola ilustra tendência, amplia mercados para biocombustível brasileiro (25/03/2010b). Disponível no site <<http://www.unica.com.br/noticias>>, consultado em 16/08/2010.
- UNICA - UNIÃO DA INDÚSTRIA DE CANA-DE-AÇÚCAR. Brasil é exemplo de diversificação no uso da cana-de-açúcar (16/06/2009a). Disponível no site <<http://www.unica.com.br/noticias>>, consultado em 16/08/2010.

UNICA - UNIÃO DA INDÚSTRIA DE CANA-DE-AÇÚCAR. Grupo de artesanato transforma cana-de-açúcar em objetos de arte (17/06/2009b). Disponível no site < <http://www.unica.com.br/noticias>>, consultado em 16/08/2010.

UNICA - UNIÃO DA INDÚSTRIA DE CANA-DE-AÇÚCAR. Investimento da Braskem em bioplástico representa inovação e sustentabilidade (12/05/2009c). Disponível no site < <http://www.unica.com.br/noticias>>, consultado em 16/08/2010.

UNICA - UNIÃO DA INDÚSTRIA DE CANA-DE-AÇÚCAR. Sugar and Ethanol from Brazil – Energy and Environmental Commodities (2004). (Disponível no site <<http://www.unica.com.br>>, consultado em 16/08/2010.

VASCONCELLOS, C. B.; LEAL, C. L. D.; FRANÇA, M. P.; CASTRO, P. F. O aproveitamento da cinza de caldeira na construção civil. *Vértices*, v.6, n.1. pp. 131-148. CEFET Campos dos Goytacazes/RJ, jan/abr 2004.

VALENCIANO, M. D. C. M.; FREIRE, W. J. Características físicas e mecânicas de misturas de solo, cimento e cinzas de bagaço de cana-de-açúcar. *Eng. Agríc., Jaboticabal*, v.24, n.3, p.484-492, set./dez. 2004.

WALTER, A.; DOLZAN, P, PIACENTE, E. Biomass energy and bio-energy trade: historic developments in Brazil and current opportunities. Country Report: Brazil – Task 40 – Sustainable Bio-energy Trade; Securing Supply and Demand. Final Version. Campinas, 2005.

YU, Q.; SAWAYAMA, K.; SUGITA, S.; SHOYA, M.; ISOJIMA, Y. The reaction between rice husk ash and  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  solution and the nature of its product. *Cement and Concrete Research* 29, p. 37 – 43. Pergamon, 1999.

ZUCCO, L. L. Avaliação do comportamento físico-químico-mecânico de misturas cimento-cinza-casca de arroz por meio de corpos de prova cilíndricos e placas prensadas. Tese (Doutorado em Engenharia Agrícola). Campinas/SP: Universidade Estadual de Campinas, UNICAMP, 2007.

ZUCCO, L. L.; BERALDO, A. L. Efeito da adição de cinza da casca de arroz em mistura cimento – casca de arroz. Eng. Agríc., Jaboticabal, v.28, n.2, p.217-226, abr./jun. 2008.