

**Avaliação do desempenho de argamassas com adição  
de cinza do bagaço de cana-de-açúcar**

**PAMELA CAMARGO MACEDO**

Ilha Solteira - SP

Fevereiro/2009

## **Avaliação do desempenho de argamassas com adição de cinza do bagaço de cana-de-açúcar**

**PAMELA CAMARGO MACEDO**

**Orientador:** Prof. Dr. Jorge Luís Akasaki

**Co-orientador:** Prof. Dr. Marco Antônio de Moraes Alcântara

**Dissertação apresentada à Faculdade de  
Engenharia – UNESP- Campus de Ilha  
Solteira, para obtenção do Título de Mestre  
em Engenharia Civil.**

**Área de Conhecimento em Estruturas.**

---

Ilha Solteira - SP

Fevereiro/2009

## FICHA CATALOGRÁFICA

Elaborada pela Seção Técnica de Aquisição e Tratamento da Informação  
Serviço Técnico de Biblioteca e Documentação da UNESP - Ilha Solteira.

M141a Macedo, Pamela Camargo.  
Avaliação do desempenho de argamassas com adição de cinza do bagaço de cana-de-açúcar / Pamela Camargo Macedo. -- Ilha Solteira : [s.n.], 2009.  
116 f. : il.

Dissertação (mestrado) - Universidade Estadual Paulista. Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira. Área de conhecimento: Estruturas, 2009

Orientador: Jorge Luís Akasaki  
Co-orientador: Marco Antônio de Moraes Alcântara  
Bibliografia: p. 90-98

1. Cinza do bagaço de cana-de-açúcar. 2. Adição mineral. 3. Argamassa.

CERTIFICADO DE APROVAÇÃO



**TÍTULO:** Avaliação do desempenho de argamassas com adição de cinza do bagaço de cana-de-açúcar

**AUTORA:** PAMELA CAMARGO MACEDO

**ORIENTADOR:** Prof. Dr. JORGE LUIS AKASAKI

Aprovada como parte das exigências para obtenção do Título de MESTRE em ENGENHARIA CIVIL pela Comissão Examinadora:

Prof. Dr. JORGE LUIS AKASAKI

Departamento de Engenharia Civil / Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira

Prof. Dr. HAROLDÓ DE MAYO BERNARDES

Departamento de Engenharia Civil / Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira

Prof. Dr. MALIK CHERIAF

Departamento de Engenharia Civil / Universidade Federal de Santa Catarina

Data da realização: 03 de fevereiro de 2009.

## DEDICATÓRIA

Aos meus pais, Rozani e Nilton, em  
reconhecimento por tudo o que fizeram por mim.

## AGRADECIMENTOS

A Ele. “Ele é meu refúgio e minha fortaleza, o meu Deus em quem confio” (Salmo 91).

Aos meus pais que me apoiaram, me deram força e incentivo para superar os obstáculos.

Ao Francisco, pelo seu amor, carinho, dedicação e compreensão ao me apoiar para a continuação desta jornada.

Ao meu orientador, Prof. Dr. Jorge Luís Akasaki, por me ensinar, com sua inesgotável calma e paciência, que todos os obstáculos podem ser superados.

Ao Engenheiro Flávio Moreira Salles, por suas preciosas colaborações e por ter disponibilizado o Laboratório CESP de Engenharia Civil para a execução de muitos ensaios.

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES), por viabilizar esta pesquisa através da bolsa de estudos concedida.

Ao Programa de Pós-graduação da Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira, incluindo os professores e funcionários, por ter acreditado e confiado em mim.

Aos técnicos do Laboratório CESP de Engenharia Civil, em especial ao Serjão, Jorge e Branco, pelo prestimoso auxílio e boa vontade no desenvolvimento desta pesquisa.

Aos técnicos do Laboratório de Engenharia Civil da UNESP, principalmente ao Mário e Gilson, pela atenção a que me foi dada.

Ao Laboratório de Concreto de Furnas Centrais Elétricas S.A. pela efetuação da análise granulométrica a laser e ao Prof. Dr. Marcelo Orlandi do Departamento de Física e Química da UNESP de Ilha Solteira pela realização da difração.

Ao Grupo de Materiais do Departamento de Física da UFMS pela disponibilidade da infraestrutura de pesquisa. Ao Prof. Dr. Fábio S. de Vicente pela colaboração e obtenção das

análises de microscopia eletrônica de varredura. A FINEP e UFMS pelo financiamento do Laboratório Multiusuários de Microscopia Eletrônica de Varredura – MULTILAM do DFI-UFMS (CT-INFRA/04) coordenado pela Profa. Dra. Ângela A.S. Tardivo Delben. A FUNDECT e CNPq pelo financiamento dos projetos do Grupo de Materiais-DFI-UFMS.

Ao Prof. Dr. Malik Cheriaf pela presença na minha banca de defesa e pela prestimosa ajuda nas correções finais.

Às empresas Holcim Brasil, Sika S.A., Instituto de Pesquisa Tecnológica – IPT, Porto de Areia São Judas Tadeu, Construquímica Comercial Ltda. pela doação do material utilizado nesta pesquisa.

Às amigas que vou levar no coração para a vida toda: Lidi, Angel, Sueila, Aline, pelo ombro amigo que tanto precisei nos momentos difíceis e nas alegrias compartilhadas.

Aos meus amigos do mestrado: Ana Paula Fugii, Ana Paula Trigo, Camila, Camilo, Gilberto, Leandro, Liane, Marcelo, Marcos, Netúlio, Pedro, Priscila, Thassya pela boa convivência e por fazer os dias passarem mais rápido.

Aos amigos Mauro, Everton e Antônio Rogério, pela contribuição intelectual e muitas vezes braçal que me ofereceram.

Ao Grupo de Pesquisa MAC- Materiais Alternativos de Construção, liderado pelo Prof. Jorge Akasaki pela disposição em me ajudar na realização dos ensaios.

À tecnóloga Msc. Sandra Bertocini e ao prof. Msc. Ricardo Nakao, por me apresentar o universo da pesquisa, fazendo com que eu me interessasse e ingressasse no mestrado.

A todos os amigos e parentes que torceram comigo para a conclusão desta dissertação.

# RESUMO

O setor sucro-alcooleiro vem se expandindo nos últimos tempos, alavancado principalmente pelo advento da bioenergia. No Brasil, a produção de cana-de-açúcar vem avançando em áreas destinadas à pecuária extensiva e a outras culturas importantes como a soja, o milho e a laranja e concerne à geração de energia elétrica pela queima do bagaço (co-geração) e ao uso de etanol como combustível de veículos automotores.

Contudo, a produção de açúcar, álcool e energia a partir da cana-de-açúcar pode causar problemas ambientais em decorrência da geração de resíduos como a cinza do bagaço de cana-de-açúcar.

Diante do panorama mundial de crescimento do setor sucro-alcooleiro aliado ao desenvolvimento sustentável, é de grande importância a realização de estudos que visem o aproveitamento destes resíduos.

Deste modo, este trabalho mostra a viabilidade técnica da utilização da cinza resultante do processo de queima do bagaço para a geração de energia como adição mineral, em argamassas. Foram realizados ensaios de caracterização química, difração de raios-X, microscopia eletrônica de varredura e atividade pozolânica da cinza do bagaço de cana-de-açúcar. Além disto, um estudo da moagem do material foi realizado, juntamente com a composição de argamassas contendo a cinza em diversos teores de substituição ao agregado miúdo. Através da resistência à compressão e à tração por compressão diametral e módulo de elasticidade, foram analisadas suas propriedades mecânicas. Também foram verificadas algumas propriedades relacionadas com a durabilidade do material, como a retração por secagem, absorção por capilaridade e reatividade acelerada pelo método acelerado de expansão em barras de argamassa.

*Palavras-chave: cinza do bagaço de cana-de-açúcar, adição mineral, argamassa.*

# ABSTRACT

The sugar-alcohol sector has expanding in the last years, mainly due to advent of the renewable energy sources and bioenergy. In Brazil, the sugarcane production has advancing towards areas of cattle creation and agriculture, such as soya bean, corn and orange and concerning to electrical energy production through the burning bagasse and alcohol used like vehicle fuel.

However, sugar, alcohol and energy production from sugarcane could cause other environmental problems in result to the wastes production such as sugarcane bagasse ash.

In the presence of worldwide growth of sugar and alcohol industry and the sustainable development, it is very important the achievement of studies that reuse these wastes.

Thus, this work shows technical viability on using sugar-cane bagasse ash (SCBA) obtained from sugar-cane bagasse burnt, as mineral addition, in mortars. It was made some tests on the SCBA, such as the chemical characterization, X-ray diffraction, pozzolanic activity, and also, images obtained by scanning electron microscope. Moreover, grinding of SCBA was carried out, and mortars were prepared with some different amounts of SBCA as replacement of fine aggregate by mass. Through the compressive strength, splitting tensile strength and modulus of elasticity its mechanical properties were verified, and also some properties related to material durability as drying shrinkage, water absorption by capillarity, potential alkali reactivity of aggregates by mortar-bar method.

*Keywords: sugarcane bagasse ash, mineral addition, mortar.*

# LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Fases da hidratação de grãos de cimentos expressas pela variação da liberação de calor em função do tempo (fonte: THOMAZ; CARNEIRO, 2007).....	23
Figura 2 - Representação aproximada das faixas composicionais de aditivos minerais e cimento Portland no sistema $\text{SiO}_2\text{-Al}_2\text{O}_3\text{-CaO}$ (fonte: adaptado de CORDEIRO, 2006 e KIHARA; CENTURIONE, 2005).....	27
Figura 3 - Evolução da produção brasileira de cana-de-açúcar (fonte: BRASIL, 2007a).....	34
Figura 4 - Produção brasileira de cana-de-açúcar referente às últimas safras em toneladas (fonte: MAPA, 2009).....	34
Figura 5 - 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 a combustão completa (d) (fonte: Cordeiro, 2006).....	37
Figura 6 - Mapa da região de onde foram coletas as cinzas utilizadas para a caracterização química deste trabalho, incluindo a localidade da cinza estudada por Santos, Formagini (2008). ....	40
Figura 7 - Variação do índice de atividade pozolânica com cimento Portland (IAP) em função do tempo de moagem e superfície específica. (fonte: CORDEIRO et al, 2004).....	43
Figura 8 - Curva granulométrica do agregado miúdo.....	52
Figura 9 - Comportamento expansivo de barras de argamassa contendo agregado procedente do Porto de Areia Nossa Senhora Aparecida (fonte: Silva, D., 2007). ....	53
Figura 10 - Fluxograma das etapas do programa experimental deste trabalho. ....	55
Figura 11 - Pontos 1, 2 e 3 de coleta das cinzas CBC1, CBC2 e CBC3, respectivamente, da lagoa de decantação da Usina Interlagos. ....	56
Figura 12 - Localização do ponto 1 de coleta da cinza CBC1 da Usina Interlagos. ....	56
Figura 13 - Localização do ponto 2 de coleta da cinza CBC2 da Usina Interlagos. ....	56
Figura 14 - Localização do ponto 3 de coleta da cinza CBC3 da Usina Interlagos. ....	56
Figura 15 - Lagoa de decantação da Destilaria Generalco S/A de onde é retirada a CBC5.....	56
Figura 16 - CBC6 retirada da base da caldeira da Destilaria Generalco S/A.....	56
Figura 17 - Mapa da região onde foram coletadas as cinzas usadas para a caracterização química. ....	57
Figura 18 - Bagaço de cana que é utilizado para a produção de vapor. ....	58
Figura 19 - Caldeiras para a queima do bagaço.....	58
Figura 20 - Mistura da água da lavagem da cana e da água do lavador de gases.....	58
Figura 21 - Água sendo levada para lagoa de decantação. ....	58
Figura 22 - Moinho de bolas. ....	59
Figura 23 - Cilindros de aço que compõem o moinho. ....	59
Figura 24 - Posicionamento do CP para ensaio à tração por compressão diametral. ....	65
Figura 25 - Ruptura do CP à tração por compressão diametral.....	65
Figura 26 - Corpo-de-prova instalado na prensa hidráulica com os relógios comparadores. ..	66
Figura 27 - Medição da expansão da barra de argamassa devido à reatividade do agregado. .	69
Figura 28 - Curva granulométrica das cinza.....	75
Figura 29 - Aspecto da cinza do bagaço de cana usada na composição das argamassas .....	76
Figura 30 - Difratograma da CBC usada neste trabalho. ....	77
Figura 31 - Morfologia das partículas de cinza do bagaço de cana sem moagem (a) e (b), moídas por 20 minutos (c) e (d), moídas por 50 minutos (e) e (f) [Imagens obtidas por MEV com aumento de 200 vezes para as figuras (a), (c) e (e) e com aumento de 800 vezes para as figuras (b), (d) e (f)].....	78

Figura 32 - Morfologia das partículas de CBC, com detalhe das formas tubulares.....	79
Figura 33 - Resistência à compressão.....	81
Figura 34 - Resistência à tração por compressão diametral. ....	82
Figura 35 - Módulo de elasticidade aos 28 dias. ....	83
Figura 36 - Reatividade potencial acelerada.....	84
Figura 37 - Absorção por capilaridade aos 7 dias. ....	85
Figura 38 - Absorção por capilaridade aos 28 dias. ....	86
Figura 39 - CPs referentes ao traço controle, aos 7 dias.....	103
Figura 40 - CPs referentes ao traço 3%, aos 7 dias ....	104
Figura 41 - CPs referentes ao traço 5%, aos 7 dias ....	105
Figura 42 - CPs referentes ao traço 8%, aos 7 dias. ....	106
Figura 43 - CPs referentes ao traço 10%, aos 7 dias. ....	107
Figura 44 - CPs referentes ao traço controle, aos 28 dias.....	108
Figura 45 - CPs referentes ao traço 3%, aos 28 dias. ....	109
Figura 46 - CPs referentes ao traço 5%, aos 28 dias. ....	110
Figura 47 - CPs referentes ao traço 8%, aos 28 dias. ....	111
Figura 48 - CPs referentes ao traço 10%, aos 28 dias. ....	112
Figura 49 - Volume de líquido absorvido por área de seção transversal em função do tempo – traço controle. ....	113
Figura 50 - Volume de líquido absorvido por área de seção transversal em função do tempo – traço 3%.....	113
Figura 51 - Volume de líquido absorvido por área de seção transversal em função do tempo – traço 5%.....	113
Figura 52 - Volume de líquido absorvido por área de seção transversal em função do tempo – traço 8%.....	114
Figura 53 - Volume de líquido absorvido por área de seção transversal em função do tempo – traço 10%.....	114
Figura 54 - Volume de líquido absorvido por área de seção transversal em função do tempo – traço controle. ....	115
Figura 55 - Volume de líquido absorvido por área de seção transversal em função do tempo – traço 3%.....	115
Figura 56 - Volume de líquido absorvido por área de seção transversal em função do tempo – traço 5%.....	115
Figura 57 - Volume de líquido absorvido por área de seção transversal em função do tempo – traço 8%.....	116
Figura 58 - Volume de líquido absorvido por área de seção transversal em função do tempo – traço 10%.....	116

# LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Principais compostos do cimento Portland (fonte: NEVILLE, 1997).....	20
Tabela 2 - Safra de 2008/2009 referente aos principais Estados produtores de cana, álcool e açúcar (fonte: MAPA, 2009). .....	35
Tabela 3 - Teor de sílica na CBC, segundo diversos autores. ....	39
Tabela 4 - Composição química da cinza do bagaço de cana (fonte: SANTOS; FORMAGINI, 2008).....	40
Tabela 5 - Composição dos cimentos comercializados no Brasil (fonte: ABCP, 2002).....	49
Tabela 6 - Produção anual de cimento Portland (fonte: SNIC, 2006).....	49
Tabela 7 - Caracterização físico-química do cimento utilizado. ....	50
Tabela 8 - Caracterização granulométrica do agregado miúdo. ....	51
Tabela 9 - Caracterização do agregado graúdo (fonte: Silva, D., 2007). ....	52
Tabela 10 - Características do aditivo superplastificante SikaViscocrete 20HE (fonte: SIKA, 2006).....	54
Tabela 11 - Local de coleta das cinzas pesquisadas. ....	55
Tabela 12 - Quantidade de material para a moldagem das barras de argamassa para a determinação da retração por secagem.....	67
Tabela 13 - Análise química da cinza do bagaço de cana da utilizada neste trabalho. ....	72
Tabela 14 - Análise química das novas amostras de CBC da Destilaria Generalco S/A. ....	73
Tabela 15 - Resultados dos ensaios realizados no estudo da moagem da cinza do bagaço de cana. ....	74
Tabela 16 - Diâmetro obtido por granulometria a laser ( $\mu\text{m}$ ). ....	75
Tabela 17 - Índice de atividade pozolânica com cal e com cimento. ....	77
Tabela 18 - Composição final dos traços de argamassa. ....	80
Tabela 19 - Retração por secagem.....	83
Tabela 20 – Resultados individuais da resistência à compressão, aos 7, 28 e 56 dias. ....	99
Tabela 21 - Resultados individuais da resistência à tração por compressão, aos 7, 28 e 56 dias. ....	100
Tabela 22 - Resultado do ensaio de absorção por capilaridade aos 7 dias. ....	101
Tabela 23 - Resultado do ensaio de absorção por capilaridade aos 28 dias. ....	102

# SUMÁRIO

<b>1 INTRODUÇÃO.....</b>	<b>13</b>
<b>1.1 Generalidades.....</b>	<b>14</b>
<b>1.2 Objetivo.....</b>	<b>16</b>
<b>1.3 Justificativa.....</b>	<b>16</b>
<b>1.4 Estrutura da dissertação .....</b>	<b>17</b>
<b>2 CIMENTO PORTLAND, ADITIVOS E ADIÇÕES.....</b>	<b>18</b>
<b>2.1 Cimento Portland.....</b>	<b>19</b>
2.1.1 Fabricação do cimento Portland.....	20
2.1.2 Hidratação do cimento Portland.....	21
<b>2.2 Aditivos .....</b>	<b>24</b>
<b>2.3 Adições .....</b>	<b>26</b>
2.3.1 Atividade Pozolânica .....	30
<b>3 CINZA DO BAGAÇO DE CANA-DE-AÇÚCAR.....</b>	<b>32</b>
<b>3.1 Cana-de-açúcar .....</b>	<b>33</b>
<b>3.2 Cinza do bagaço de cana-de-açúcar .....</b>	<b>36</b>
3.2.1 Composição Química.....	39
3.2.2 Perda ao fogo .....	41
3.2.3 Moagem e finura .....	42
3.2.4 Interação na matriz cimentícia.....	43
3.2.5 Resistência mecânica .....	44
3.2.6 Durabilidade.....	45
<b>4 PROGRAMA EXPERIMENTAL .....</b>	<b>47</b>
<b>4.1 Introdução .....</b>	<b>48</b>
<b>4.2 Material.....</b>	<b>48</b>
4.2.1 Cimento.....	48
4.2.2 Agregado miúdo.....	51
4.2.3 Agregado graúdo.....	52
4.2.4 Cal.....	53
4.2.5 Água.....	53
4.2.6 Impermeabilizante.....	54
4.2.7 Aditivo superplastificante .....	54
<b>4.3 Método .....</b>	<b>54</b>
4.3.1 Coleta da cinza de bagaço de cana-de-açúcar .....	55
4.3.2 Caracterização química da cinza do bagaço de cana-de-açúcar .....	58
4.3.3 Moagem .....	59
4.3.4 Distribuição granulométrica.....	60
4.3.5 Índice de Atividade Pozolânica.....	60
4.3.6 Difração de raios-X.....	63
4.3.7 Microscopia eletrônica de varredura.....	63
4.3.8 Confecção de argamassas de cimento, areia e CBC.....	64
4.3.9 Resistência à compressão.....	65
4.3.10 Resistência à tração por compressão diametral.....	65
4.3.11 Módulo de elasticidade .....	66
4.3.12 Retração por secagem .....	66
4.3.13 Reatividade acelerada .....	68
4.3.14 Absorção por capilaridade e sorptividade .....	69

<b>5 RESULTADOS</b> .....	<b>71</b>
<b>5.1 Caracterização química da cinza</b> .....	<b>72</b>
<b>5.2 Moagem</b> .....	<b>74</b>
<b>5.3 Distribuição granulométrica</b> .....	<b>74</b>
<b>5.4 Atividade pozolânica</b> .....	<b>76</b>
<b>5.5 Difração de raios-X</b> .....	<b>77</b>
<b>5.6 Microscopia eletrônica de varredura</b> .....	<b>78</b>
<b>5.7 Confeção de argamassas</b> .....	<b>79</b>
<b>5.8 Resistência à compressão</b> .....	<b>80</b>
<b>5.9 Resistência à tração compressão diametral</b> .....	<b>81</b>
<b>5.10 Módulo de elasticidade</b> .....	<b>82</b>
<b>5.11 Retração por secagem</b> .....	<b>83</b>
<b>5.12 Reatividade acelerada</b> .....	<b>84</b>
<b>5.13 Absorção por capilaridade</b> .....	<b>85</b>
<b>6 CONCLUSÕES</b> .....	<b>87</b>
<b>6.1 Conclusões</b> .....	<b>88</b>
<b>6.2 Sugestões para trabalhos futuros.</b> .....	<b>89</b>
<b>REFERÊNCIAS</b> .....	<b>90</b>
<b>APÊNDICE</b> .....	<b>99</b>

# 1 INTRODUÇÃO

---

“No que diz respeito a todos os atos de iniciativa e criação, há uma verdade elementar cujo desconhecimento mata inúmeras idéias: a de que no momento em que nos comprometemos definitivamente, a providência também entra em ação”.

Johann Wolfgang von Goethe

## ***1.1 Generalidades***

O setor sucro-alcooleiro vem expandindo nos últimos tempos, alavancado principalmente pelo advento da energia renovável. No Brasil, a produção de cana-de-açúcar vem avançando em áreas destinadas à pecuária extensiva e a outras culturas importantes como a soja, o milho e a laranja. Isto se deve tanto pela geração de energia elétrica a partir da queima do bagaço (co-geração) quanto pelo uso de etanol como combustível de veículos automotores.

Estima-se que, em 2010, através do consumo mundial previsto de 70 bilhões de litros de etanol combustível, serão cumpridas as metas definidas pelo Protocolo Quioto já que o uso do álcool reduz em 50% a emissão de monóxido de carbono dos motores veículos (BRASIL, 2007b). No mercado interno, o aumento das vendas de veículos flexíveis associado à adição de 25% de álcool anidro na gasolina pode gerar uma demanda interna de 20 bilhões de litros de etanol em 2010 (BRASIL, 2007b).

Apesar do processo de co-geração liberar dióxido de carbono - CO<sub>2</sub> para a atmosfera, a quantidade de emissões é significativamente menor se comparada com outras fontes de energia como o petróleo (FREITAS, 2005).

Entretanto, a produção de açúcar, álcool e energia a partir da cana-de-açúcar pode causar outros problemas ambientais como a geração de resíduos: a palha, a cinza da palha - no caso de colheita manual, o bagaço e a cinza do bagaço.

Diante deste panorama mundial de crescimento do setor sucro-alcooleiro aliado ao desenvolvimento sustentável é de suma importância a realização de estudos que visem o aproveitamento destes resíduos, transformando-os em produtos de valor comercial.

A gestão adequada destes resíduos implica na necessidade de se estudar mercados onde seu reaproveitamento seja possível e, por ser o setor que mais consome energia e matérias-primas naturais (JOHN, 2000), a construção civil pode servir como um importante instrumento para absorver os seus próprios resíduos e os de outros setores, como o sucro-alcooleiro,

mencionado anteriormente. A inclusão destes resíduos, deste modo, pode trazer sua contribuição sob diversos aspectos.

A transformação de resíduos em subprodutos pode atenuar o impacto ambiental por proporcionar uma alternativa de destinação além de reduzir o consumo de recursos naturais.

O bagaço de cana estudado por Monteiro et al. (1998), por exemplo, foi empregado como reforço de resina polimérica para a fabricação de compósitos de baixo custo. Bilba, Arsene e Ouensanga (2003) aplicaram fibras de bagaço de cana em reforço de compósitos de cimento.

Já a cinza do bagaço de cana foi usada para diversas aplicações: como substituição do agregado miúdo (BAGUANT, 1995, MARTINS; ZANELLA; PAULINO JUNIOR, 2007), como incorporação na massa cerâmica para fabricação de telhas, tijolos e placas cerâmicas nos estudos de Teixeira (2007) e de Borlini et al. (2006). A cinza também foi empregada em misturas de solo-cimento (MESA VALENCIANO; FREIRE, 2004), como modificação de solo laterítico para estabilização de solos pesquisada por Mu'Azú (2007), como filler em compostos de fibrocimento (ZARDO et al., 2004).

Além disso, o uso destes rejeitos tem contribuído para o desenvolvimento da química dos materiais através da investigação da hidratação do cimento e da reação pozolânica da cinza do bagaço de cana-de-açúcar, nos estudos de Payá et al. (2002), Martirena-Hernández et al. (1998, 2000, 2001), e da cinza da palha de cana-de-açúcar estudada por Moisés Frias et al. (2005), Villar-Cociña et al. (2003), entre outros.

Outro benefício encontrado pelo aproveitamento destas cinzas se deve à redução do consumo de cimento, tanto no seu processo de fabricação pela economia de energia gasta e pela redução das matérias-primas usadas quanto na produção de concreto e argamassa, conforme estudos de Caldas et al (2000), Cordeiro (2006), Ganesan, Rajagopal e Thangavel (2007), Santos e Formagini (2008), Singh, Singh e Rai (2000), entre outros.

## ***1.2 Objetivo***

O objetivo deste trabalho é verificar a viabilidade da utilização em argamassa do resíduo de cinza do bagaço de cana-de-açúcar, resultante do processo de queima do bagaço para a geração de energia e propondo uma destinação adequada. Para tanto, são realizados estudos relativos à atividade pozolânica do material, composição de traços em argamassa e suas características físicas e químicas.

## ***1.3 Justificativa***

São Paulo é o Estado responsável pela maior produção de cana-de-açúcar no Brasil, tendo mais de 337 milhões de toneladas de cana moída na safra de 2008/2009, o que corresponde a cerca de 64% da produção nacional (Ministério de Agricultura, Pecuária e Abastecimento – MAPA, 2009).

Segundo as estimativas de cálculo dos resíduos de Federação das Indústrias do Estado de São Paulo/ Centro das Indústrias do Estado de São Paulo - FIESP/CIESP (2001) e os dados atualizados de MAPA (2009), a safra nacional de 2008/2009 produziu 529,9 milhões de toneladas de cana, e só no Estado de São Paulo, foram produzidas 337,8 milhões de toneladas de cana. Nas caldeiras de todo o país foram utilizadas 130,8 milhões de toneladas de bagaço e 83,4 milhões de tonelada de cana em São Paulo, o que gerou um montante de 3,11 milhões e 1,98 milhões de toneladas de cinza do bagaço de cana, no Brasil e em São Paulo, respectivamente.

Sabe-se que o aproveitamento de resíduos pode muitas vezes trazer melhorias técnicas, além da redução de custos e de impacto ambiental, visto que tem crescido no mundo inteiro. Deste modo, este trabalho visa analisar a capacidade de utilização da cinza do bagaço de cana-de-açúcar em argamassas além de possibilitar informações referentes a este resíduo para estudos futuros.

## ***1.4 Estrutura da dissertação***

Esta dissertação foi elaborada para proporcionar o devido o entendimento do tema bem como a análise dos resultados obtidos, abrangendo 6 capítulos.

**Capítulo 1 – Introdução:** aborda o contexto no qual a dissertação está inserida, englobando os aspectos técnicos que justificam o investimento conferido à dissertação e também traz os objetivos que guiaram o desenvolvimento do trabalho.

**Capítulo 2 – Cimento Portland, adições e aditivos:** apresenta uma revisão bibliográfica dos temas mais relevantes para a pesquisa: cimento Portland, aditivos e adições.

**Capítulo 3 – Cinza do bagaço de cana-de-açúcar (CBC):** apresenta uma revisão bibliográfica sobre a cinza do bagaço de cana-de-açúcar, incluindo um panorama geral do setor.

**Capítulo 4 – Programa experimental:** trata das etapas do programa experimental, detalhando a metodologia empregada para a caracterização dos materiais e para a realização dos ensaios.

**Capítulo 5 – Resultados:** indica os resultados obtidos no programa experimental bem como a análise e a discussão pertinentes a cada resultado apresentado.

**Capítulo 6 – Conclusão:** relata as conclusões e comentários pertinentes aos resultados obtidos e algumas sugestões para pesquisas futuras.

## **2 CIMENTO PORTLAND, ADITIVOS E ADIÇÕES**

---

“Conheça o amor de Deus que excede todo o entendimento”.  
Efésios 3:19

## ***2.1 Cimento Portland***

O cimento Portland, principal aglomerante hidráulico usado no concreto moderno, é o produto de uma indústria que, além de consumir grande quantidade de energia, é responsável pela emissão de enormes quantidades de dióxido de carbono.

Cada tonelada de cimento produzido requer 1,7 toneladas de matéria prima - argila e calcário (CORDEIRO, 2006), consome cerca de 5 GJ de energia (STRUBLE; GODFREY, 2004), e em torno de uma tonelada de dióxido de carbono é emitido para a atmosfera (NEVILLE, 1997).

Segundo Mehta (2002), o concreto comum contém por volta de 12% de cimento, 8% de água e 80% de agregados, em massa. Isto significa que, somados aos 1,6 bilhões de toneladas de cimento usado no mundo, a indústria do concreto está consumindo 10,0 bilhões de toneladas de agregado miúdo e graúdo e 1,0 bilhão de toneladas de água, anualmente. São bilhões de toneladas de consumo de recursos naturais não renováveis (agregados, água e as matérias-primas para a fabricação do cimento).

Embora o concreto contribua com o impacto ambiental, é possível pôr em prática o desenvolvimento sustentável nesta indústria, aliando o desenvolvimento tecnológico à preservação do meio ambiente.

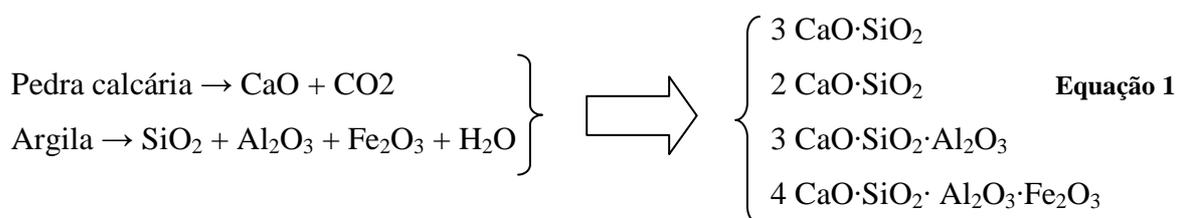
Recentemente, a indústria do cimento tem conseguido significativos progressos, especialmente no campo do desenvolvimento sustentável. As cimenteiras estão reduzindo a eliminação de poluentes e resíduos industriais e economizando energia através da utilização da adição mineral como a escória, o fíler e a pozolana além da diminuição do uso de matérias-primas como o clínquer.

### 2.1.1 Fabricação do cimento Portland

O processo de fabricação do cimento Portland consiste na moagem das matérias-primas, na mistura em proporções adequadas, e na sua queima em um grande forno rotativo até uma temperatura de cerca de 1450°C. Nesta temperatura, o material sofre fusão incipiente formando pelotas, conhecidas como clínquer. O clínquer é resfriado rapidamente e moído até tornar-se um pó bem fino; e, então é finalizado com adição de gesso.

Na etapa de queima das matérias-primas para a produção de clínquer ocorrem transformações mineralógicas que resultam nos componentes formadores do clínquer Portland: silicato tricálcico ou alita (C<sub>3</sub>S), silicato dicálcico ou belita (C<sub>2</sub>S), aluminato tricálcico (C<sub>3</sub>A) e ferroaluminato tetracálcico (C<sub>4</sub>AF) (KIHARA; CENTURIONE, 2005). Outros componentes podem ocorrer em menor quantidade, como a cal livre (CaO), o periclásio (MgO) e sulfatos alcalinos (CORDEIRO, 2006).

As reações químicas que ocorrem no sistema de forno do cimento podem ser representadas de maneira simplificada pela Equação 1 (MEHTA; MONTEIRO, 1994).



Os produtos da reação estão indicados a seguir na Tabela 1, com sua respectiva composição química e abreviação.

**Tabela 1** – Principais compostos do cimento Portland (fonte: NEVILLE, 1997).

Nome do composto	Composição	Abreviação
Silicato tricálcico	3 CaO·SiO <sub>2</sub>	C <sub>3</sub> S
Silicato dicálcico	2 CaO·SiO <sub>2</sub>	C <sub>2</sub> S
Aluminto tricálcico	3 CaO·SiO <sub>2</sub> · Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	C <sub>3</sub> A
Ferroaluminato tetracálcico	4 CaO·SiO <sub>2</sub> · Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> · Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	C <sub>4</sub> AF

Após o processo de queima, o clínquer é resfriado, cujo objetivo é impedir que as reações de transformações mineralógicas obtidas no interior do forno sejam revertidas durante o resfriamento (KIHARA; CENTURIONE, 2005).

A moagem, uma das últimas etapas da fabricação do cimento, é um processo de cominuição sob ação complexa de cargas mecânicas. Sua importância está relacionada com a finura e com a distribuição granulométrica do cimento. A finura governa a velocidade da reação de hidratação do cimento, uma vez que este parâmetro está intimamente ligado à superfície específica das partículas.

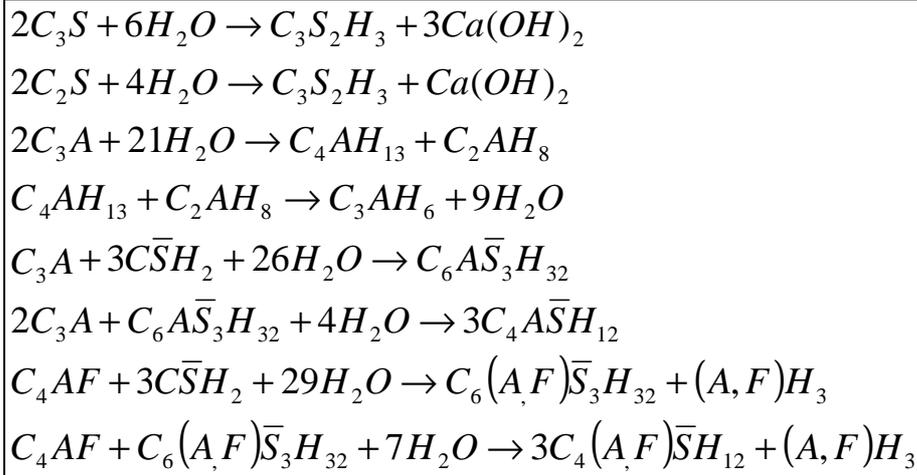
### **2.1.2 Hidratação do cimento Portland**

A reação de hidratação, em estágios iniciais, ocorre por dissolução-precipitação, ou seja, inicia-se com a dissolução do grão anidro em um meio aquoso, levando à precipitação de compostos hidratados (SILVA, M., 2007).

Em estágios posteriores, a hidratação na partícula residual de cimento pode ocorrer por reações no estado sólido, mecanismo denominado por Mehta e Monteiro (1994) de topoquímico.

A hidratação do cimento Portland consiste em reações simultâneas dos compostos anidros presentes no cimento com a água, embora estas reações não ocorram na mesma velocidade (MEHTA; MONTEIRO, 1994).

Para Jolicouer e Simard (1998), as reações de hidratação do cimento Portland envolvem uma série de reações descritas na Equação 2, e assim levando a mais complexos processos e produtos:



**Equação 2**

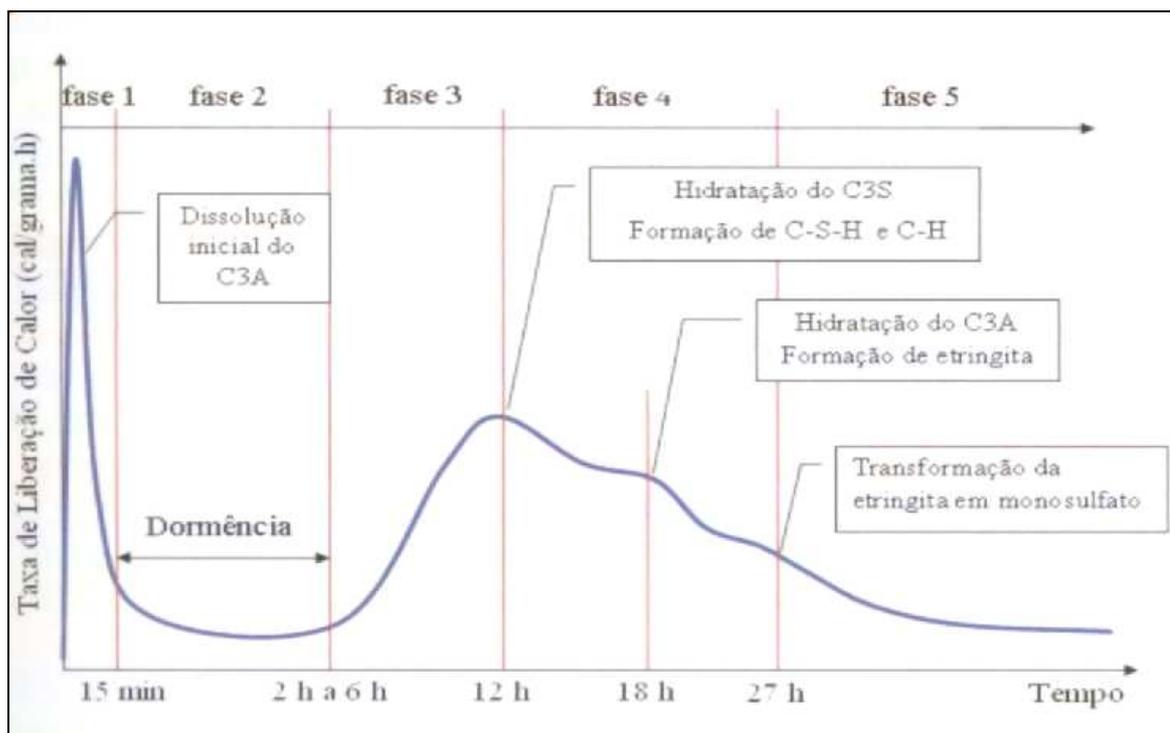
A hidratação do C<sub>2</sub>S e do C<sub>3</sub>S produz uma família de silicatos de cálcio hidratados (C-S-H), que variam quanto à relação cálcio/sílica e ao teor de água quimicamente combinada (MEHTA; MONTEIRO, 1994). Estes silicatos necessitam aproximadamente de iguais quantidades de água para a hidratação, mas o C<sub>3</sub>S produz uma quantidade maior de hidróxido de cálcio quando comparado ao C<sub>2</sub>S (NEVILLE, 1997). Cimentos com maior teor de C<sub>2</sub>S são mais duráveis a ambientes sulfatados e ácidos, devido à reduzida presença de hidróxido de cálcio quando comparados com cimentos contendo alto teor de C<sub>3</sub>S (MEHTA; MONTEIRO, 1994).

O C<sub>3</sub>S hidrata a uma velocidade maior e libera quantidade maior de calor que o C<sub>2</sub>S além de contribuir para o tempo final de pega e para a resistência inicial da pasta de cimento (MEHTA; MONTEIRO, 1994). Segundo Gava (1999), a hidratação do C<sub>3</sub>S se inicia nas primeiras horas de idade e é prolongada até 28 dias de idade. No entanto, o C<sub>2</sub>S é responsável pelo aumento de resistência nas idades avançadas (CORDEIRO, 2006), pois a reação deste começa após 28 dias de idade (GAVA, 1999).

A reação do C<sub>3</sub>A com água é muito rápida, liberando grande quantidade de calor; inicia-se nas primeiras horas se estendendo até 3 dias de idade. O C<sub>3</sub>A é o principal responsável pela pega e endurecimento (GAVA, 1999). Para retardar ou inibir esta rápida reação, adiciona-se sulfato de cálcio (gipsita), formando sulfoaluminato de cálcio (CORDEIRO, 2006), mais conhecido como etringita.

A hidratação do  $C_4AF$  forma produtos estruturalmente similares àqueles formados na hidratação do  $C_3A$  (MEHTA; MONTEIRO, 1994), porém exercendo pouca influência sobre as propriedades da pasta (CORDEIRO, 2006).

Como as reações de hidratação são exotérmicas, é possível acompanhar as taxas de reação através da quantidade de calor liberado, como pode ser visto na Figura 1.



**Figura 1** - Fases da hidratação de grãos de cimentos expressas pela variação da liberação de calor em função do tempo (fonte: THOMAZ; CARNEIRO, 2007).

Na fase 1, é iniciada a dissolução do aluminato tricálcico ( $C_3A$ ), em presença de água, com a formação da etringita; grande quantidade de calor é liberado rapidamente (CORDEIRO, 2006).

Após esta fase, inicia-se o período de dormência, no qual o prosseguimento da hidratação do cimento é prejudicado devido à formação de etringita na superfície dos grãos de cimento (THOMAZ; CARNEIRO, 2007).

No terceiro estágio, há a retomada da reação principalmente devido à hidratação do  $C_3S$ , com a formação de silicatos de cálcio hidratados (C-S-H) e de hidróxido de cálcio (C-H) e com o aumento da taxa de liberação de calor.

Na fase seguinte, fase 4, a taxa de liberação de calor começa a cair em função da hidratação do  $C_3A$  e do  $C_3S$ , sendo formados os compostos C-S-H e etringita. Segundo Cordeiro (2006), a contribuição do  $C_2S$  neste processo aumenta e, conseqüentemente, a taxa de formação do hidróxido de cálcio diminui.

A seguir, na fase final, a hidratação passa a ser menor, com a diminuição da taxa de liberação de calor até um nível constante.

## ***2.2 Aditivos***

American Concrete Institute - ACI (2000), através do Comitê 116, se refere a aditivo como sendo o material, com exceção da água, agregados, cimento hidráulico e fibras, usado como ingrediente de mistura cimentícia para modificar seu estado fresco ou endurecido.

Para Edmeades e Hewlett (2007) os aditivos se diferenciam das adições, sendo que estas são geralmente sólidas e são adicionadas ao cimento durante sua fabricação ou são utilizadas na produção de concretos e argamassas (escória de alto-forno, sílica ativa, entre outros). Além disso, existe a limitação da quantidade de aditivo definida pelo fabricante, diferente das adições que não têm restrições em relação à quantidade empregada desde que atenda às necessidades adequadas.

Ainda segundo Edmeades e Hewlett (2007), nos últimos trinta anos vem ocorrendo um aumento do uso de aditivos em concretos justificado pela crescente preocupação com sua durabilidade e sua aparência visual. Ao mesmo tempo, tem ocorrido crescente quantidade de pesquisas (FLATT; HOUST, 2001, BARBOSA et al., 2006, JOLICOUER; SIMARD, 1998, MALHOTRA, 1994, 1997, 2000, 2003), resultando em grande avanço na tecnologia dos aditivos químicos.

Edmeades e Hewlett (2007) classificam os aditivos em redutores de água (plastificantes), superplastificantes, incorporadores de ar, retardadores, aceleradores, impermeabilizantes e aditivos especiais.

O aditivo redutor de água ou plastificante provoca boa dispersão dos grãos de cimento, evitando a sua floculação, além aumentar a fluidez do concreto, sem adição de mais cimento ou água e elevar a resistência à compressão sem aumentar o teor de cimento ou reduzir a consistência da mistura (MEHTA; MONTEIRO, 1994). Tais aditivos podem também modificar o tempo de pega do concreto, resultando em retardamento da pega (ACI, 1981).

Comparados aos aditivos plastificantes, os superplastificantes ou redutores de água de alta eficiência são capazes de reduzir três a quatro vezes a água e podem ser incorporados em quantidades maiores sem causar exsudação excessiva e retardamento do tempo de pega (MEHTA; MONTEIRO, 1994).

Prudêncio Júnior (2005) afirma que o emprego dos aditivos redutores de água no concreto projetado tem como objetivo facilitar seu processo de bombeamento e reduzir a relação água-cimento, permitindo o alcance de altas resistências à compressão.

Os aditivos incorporadores de ar devem ser usados no concreto quando este estiver exposto a ciclos de congelamento e descongelamento, sendo aplicado em pavimentos de rodovias, pisos de estacionamentos e calçadas (ACI, 1981). Este tipo de aditivo promove melhoria da trabalhabilidade e da coesão do concreto embora reduza a sua resistência (EDMEADES; HEWLETT, 2007).

No caso dos aditivos retardadores de pega, sua importância se deve ao fato de propiciar o lançamento e o acabamento adequados do concreto em condições de temperaturas elevadas e de controlar a pega de grandes unidades estruturais para manter o concreto trabalhável durante seu lançamento (MEHTA; MONTEIRO, 1994).

O comitê 212 do ACI (1981) salienta que os benefícios dos aceleradores de pega, principalmente em clima frio, incluem redução do tempo de cura e proteção, aceleração da operação de acabamento, aumento da taxa de desenvolvimento da resistência, permitindo a desforma mais rápida e vedação mais eficiente de vazamentos contra pressão hidráulica. Além

disso, os aditivos aceleradores de pega também podem ser aplicados no concreto projetado em escavações de solos instáveis (EDMEADES; HEWLETT, 2007), em tetos e superfícies verticais sem haver deslocamento e escorrimento e em revestimento de obras subterrâneas por proporcionar resistência em poucas horas após a aplicação (PRUDÊNCIO JÚNIOR, 2005).

### ***2.3 Adições***

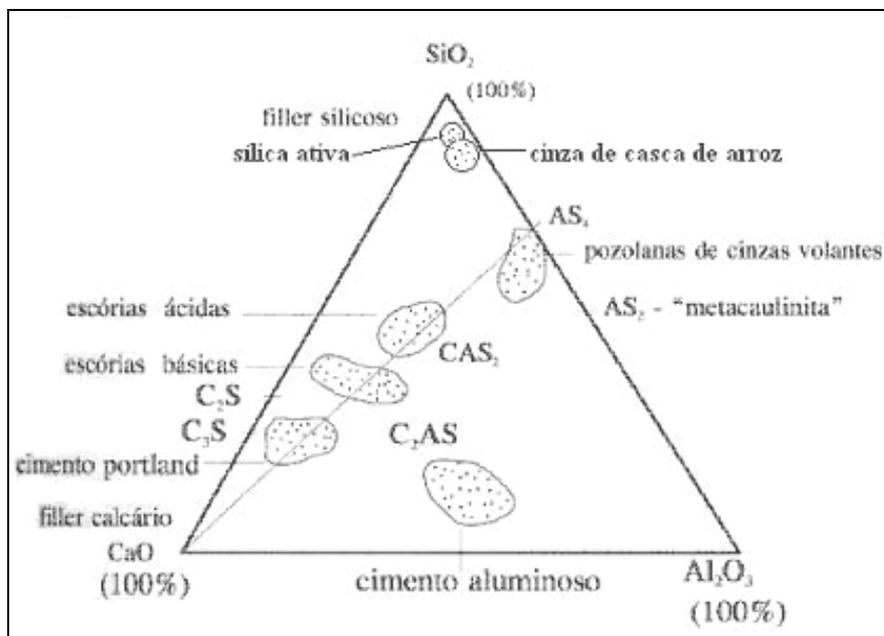
Conforme a NBR 11172 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - ABNT, 1992), as adições são produtos de origem mineral adicionadas aos cimentos, argamassas e concretos com a finalidade de alterar suas características. A adição mineral interage química e fisicamente com os produtos da hidratação do clínquer ou do cimento Portland, modificando a microestrutura da pasta (SILVA, M., 2007) e as propriedades físicas e químicas do produto final endurecido (ACI, 1981).

As principais adições minerais usadas em argamassas e concretos são: sílica ativa, metacaulim, escória de alto forno e cinza volante. A sílica ativa é um subproduto industrial do processo de produção das ligas de ferro-silício ou silício metálico em grandes fornos elétricos de fusão, do tipo arco voltaico. O metacaulim é uma adição mineral alumino-silicosa proveniente da calcinação de argilas caulínicas ou de argilas especiais como o caulim de alta pureza (CARMO; PORTELLA; VALDUGA, 2007).

As escórias granuladas de alto-forno são subprodutos não metálicos oriundos da indústria de ferro gusa. A cinza volante, que é a pozolona mais empregada na fabricação do cimento, é um subproduto originado da queima de carvão mineral para a produção de energia elétrica, principalmente das usinas termoelétricas.

Dal Molin (2005) salienta que a eficiência de uma adição mineral pode variar em função da quantidade utilizada, das condições de cura, da composição química, mineralógica e granulométrica.

A Figura 2 mostra a representação aproximada das faixas de composição de aditivos minerais e de cimento Portland no sistema  $\text{SiO}_2\text{-Al}_2\text{O}_3\text{-CaO}$ .



**Figura 2** - Representação aproximada das faixas composicionais de aditivos minerais e cimento Portland no sistema  $\text{SiO}_2\text{-Al}_2\text{O}_3\text{-CaO}$  (fonte: adaptado de CORDEIRO, 2006 e KIHARA; CENTURIONE, 2005).

As adições minerais podem ser utilizadas tanto no processo de fabricação do cimento, com a substituição de uma parte do clínquer, ou ainda em argamassas e em concretos. No Brasil, a prática mais utilizada é o uso de adição mineral no processo de fabricação do cimento por trazer inúmeras vantagens.

Do ponto de vista técnico, as adições minerais podem melhorar a qualidade do concreto. Tecnicamente, as adições minerais têm custos e preços menores quando comparadas ao cimento Portland ou ao clínquer Portland (SILVA, M., 2007).

Há também as justificativas relacionadas à sustentabilidade da construção civil. A incorporação de adições minerais como escórias e pozolanas pode reduzir o consumo de energia além de diminuir substancialmente a produção de gás carbônico para a produção de cimentos (DAL MOLIN, 2005).

Dentre os cimentos contendo as adições, destacam-se o Cimento Portland Composto (CP II-E, CP II-F ou CP II-Z), o Cimento Portland de Alto-Forno (CP III) e o Cimento Portland

Pozolânico (CP IV). Os cimentos CP II-E e CP III contém escória granulada de alto-forno, já o CP II-Z e o CP IV possuem a pozolana em sua composição e o CP II-F contém fíler em sua constituição (ABCP, 2002).

A utilização de rejeitos agrícolas, como a cinza de casca de arroz, e industriais, tais como a cinza volante, a escória granulada de alto-forno e a sílica ativa, em misturas cimentíceas, tem se mostrado indispensável devido às modificações na matriz cimentícea que podem trazer vantagens microestruturais e, deste modo, contribuindo para concretos de maior durabilidade (HOPPE; CINCOTTO, 2007).

O cimento Portland de alto forno surgiu na Alemanha em 1892; já no Brasil, o processo de introdução de escória iniciou-se em 1952, com a empresa Cimento Tupi, em Volta Redonda - RJ (BATTAGIN, apud KIHARA; CENTURIONE, 2005). Os cimentos Portland pozolânicos começaram a ser produzidos com pozolanas naturais de rochas vulcânicas na Itália, a partir de 1923 (ZAMPIERI, apud KIHARA; CENTURIONE, 2005). A comercialização brasileira deste cimento deu-se em 1969, com a empresa S.A. Indústrias Reunidas Francisco Matarazzo, com o uso de cinzas volantes originadas da Termoelétrica de Charqueadas (BATTAGIN, apud KIHARA; CENTURIONE, 2005).

Dal Molin (2005) e Silva, M. (2007) dividem as adições minerais, de acordo com sua ação físico-química, em três grupos - material cimentante, material pozolânico e material não reativo.

a) Material cimentante

Não necessita de hidróxido de cálcio presente no cimento Portland para formar produtos cimentantes como o C-S-H. No entanto, sua auto-hidratação normalmente é lenta, e a quantidade de produtos cimentantes formados é insuficiente para aplicação do material para fins estruturais. Para acelerar a hidratação, faz-se o uso com adição ou substituição de cimento Portland. Um exemplo disto é a escória granulada de alto-forno.

b) Material pozolânico

Pozolana é um material silicoso ou sílico-aluminoso, que por si só, possui pouco ou nenhum valor cimentício, mas quando finamente dividido e em presença de umidade, reage quimicamente com o hidróxido de cálcio à temperatura ambiente para formar compostos que possuem propriedades cimentícias, segundo Comitê 116 do ACI (2000). Existem as pozolanas naturais, de origem vulcânica e as artificiais, como a cinza volante, a argila calcinada, a sílica ativa, a cinza de casca de arroz, entre outros.

c) Material não reativo

É o caso do fíler que, quando finamente dividido (com diâmetro próximo ao do cimento), não possui atividade química. Sua ação se resume a um efeito físico de empacotamento granulométrico, uma vez que possibilita o preenchimento dos vazios entre as partículas de cimento disperso, promovendo aumento na compacidade da mistura e, conseqüentemente, refinamento dos poros (CORDEIRO, 2006).

Pode-se atribuir às adições minerais os efeitos físicos e químicos provocados na microestrutura do concreto.

***Efeito físico***

Está associado ao preenchimento dos vazios pelas minúsculas partículas de adições, levando ao aumento da densidade da mistura, chamado de efeito filer. Além disso, ocorre refinamento da estrutura de poros e de produtos da hidratação do cimento, causado pelas pequenas partículas das adições que podem agir como pontos de nucleação para os produtos de hidratação. Desta forma, o crescimento dos cristais ocorrerá não somente a partir da superfície dos grãos de cimento, mas também nos espaços ocupados pela adição e pela água, influenciando a cinética da hidratação (acelera as reações) e os tipos de produtos (DAL MOLIN, 2005).

O efeito físico também está associado à alteração da microestrutura da zona de transição, pois as adições interferem na movimentação das partículas de água, reduzindo ou eliminando o acúmulo de água livre que normalmente fica retido sob os agregados. Além de contribuir para a redução da zona de transição pela redução da exsudação, a adição pode interferir no crescimento dos cristais, restringindo seus tamanhos e reduzindo o grau de orientação dos cristais de hidróxido de cálcio junto ao agregado. (DAL MOLIN, 2005).

### *Efeito químico*

O efeito químico diz respeito à reação pozolânica dos compostos quimicamente ativos da adição com o hidróxido de cálcio -  $\text{Ca(OH)}_2$  - formado durante a hidratação do cimento Portland, para formar silicato de cálcio hidratado adicional (CORDEIRO, 2006).

Mehta e Monteiro (1994) consideram três aspectos da reação pozolânica: a reação é lenta, conseqüentemente a taxa de liberação de calor e o desenvolvimento da resistência também são lentos; a reação consome óxido de cálcio, o que contribui para a durabilidade da pasta endurecida frente aos meios ácidos e os produtos da reação são bastante eficientes no preenchimento dos espaços capilares grandes, melhorando a resistência e impermeabilidade do sistema.

### **2.3.1 Atividade Pozolânica**

A atividade pozolânica se refere à reação entre a sílica ( $\text{SiO}_2$ ) e/ou alumina ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) da pozolana com o hidróxido de cálcio, que é liberado pela hidratação do cimento, em presença de água, formando silicatos de cálcio hidratados (C-S-H), aluminatos de cálcio hidratados (A-C-H) e/ou silicoaluminatos de cálcio hidratados (S-A-C-H).

Cook apud Paula (2006) define que a atividade pozolânica pode ser classificada conforme as propriedades mecânicas (resistência à compressão), físicas (difração de raios-X para determinar as fases cristalinas da sílica) e químicas (através da determinação da cal consumida); embora os resultados dos diferentes métodos tenham pouca correlação.

A avaliação das propriedades mecânicas se faz pela resistência à compressão, que está associada à formação de silicatos de cálcio hidratado. Do ponto de vista químico, o consumo de hidróxido de cálcio na reação é analisado. Fisicamente, a natureza e o teor das fases ativas da pozolana – sílica e alumina - é outro parâmetro físico a ser considerado (CORDEIRO, 2006).

A velocidade com que o hidróxido de cálcio é consumido pode ser um importante indicador do avanço da reação de hidratação, sempre que se evite a carbonatação pelo contato com a atmosfera (MARTIRENA-HERNÁNDEZ et al., 2000).

Para que um material seja classificado como material pozolânico, ABNT (1992), através da NBR 12653, estabelece algumas exigências físicas e químicas, tais como o valor mínimo de 70% para a soma dos teores de  $\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3$ , a perda ao fogo máxima de 6%. Além disso, a mesma norma estipula o índice de atividade pozolânica com cimento, aos 28 dias, mínimo de 75% e o valor mínimo de 6,0 MPa para a atividade pozolânica com cal.

Contudo, Tashima (2006) critica o valor mínimo de 70% da soma  $\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3$  exigido pela NBR 12653 (1992), já que a reação pozolânica está diretamente relacionada com a presença de  $\text{SiO}_2$  e/ou  $\text{Al}_2\text{O}_3$  em estado amorfo e não propriamente com a porcentagem de óxidos presentes.

O teor de anidro sulfúrico ( $\text{SO}_3$ ) deve ter valor máximo de 4% conforme os parâmetros da NBR 12653 (ABNT, 1992) para evitar-se a expansão pela formação de etringita já nas primeiras idades. A presença de sódio e potássio em teor elevado pode ser indesejável por favorecer o aparecimento de eflorescências ou a ocorrência de reação álcali-agregado (SILVA, M., 2007). O teor máximo de álcalis disponíveis, expresso em  $\text{Na}_2\text{O}$  equivalente ( $\text{Na}_2\text{O} + 0,64\text{K}_2\text{O}$ ) é 1,5 para ABNT (1992) pela NBR 12653.

## **3 CINZA DO BAGAÇO DE CANA-DE- AÇÚCAR**

---

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

### **3.1 Cana-de-açúcar**

A cana-de-açúcar é um produto agrícola originado do sudeste da Ásia; e é cultivada no Brasil desde a colonização portuguesa. A cana foi trazida para o Brasil em 1532 por Martin Afonso de Sousa, tendo a zona da mata nordestina como a principal região de produção; desde então passou a ter significativa importância para o país (BRASIL, 2007a).

A importância da cana se deve ao fato de ter sua utilização diversificada: empregada como matéria-prima para a fabricação de álcool, açúcar, aguardente. Todavia, a principal destinação da cana-de-açúcar no Brasil é a fabricação de açúcar e álcool. No entanto, já existe tecnologia, brasileira e internacional, por meio das quais se aproveitam diversos subprodutos, tais como, bagaço, palhiço\*, méis, torta de filtro e vinhaça (RIPOLI; RIPOLI, 2004).

Vale lembrar que, nas usinas de açúcar, o álcool é fabricado com o mel resultante de produção de açúcar; assim a maioria das usinas possui destilaria anexa para a fabricação de álcool (PINTO, 1999).

O emprego da cana-de-açúcar para gerar álcool ou açúcar tem variado ao longo do tempo. Na década de 1970, cerca de 90% da cana era transformada em açúcar; posição que se inverteu nos anos 1980, depois da criação do PROÁLCOOL, quando cerca de 80% da cana era destinada à produção de álcool (BRASIL, 2007b). Deste modo, multiplicou-se o número de destilarias autônomas que produzem álcool diretamente do caldo de cana, sem se preocupar com o açúcar (PINTO, 1999).

A Figura 3 mostra a evolução da produção brasileira de cana-de-açúcar desde 1948 a 2005. Conforme MAPA (2009), a Figura 4 mostra a produção de cana com os dados mais atualizados das últimas safras.

---

\* Os autores definem o palhiço como o material remanescente sobre a superfície do talhão após a colheita, principalmente, a mecanizada. Constituído de folhas verdes palhas, ponteiros e/ou suas frações; frações de colmos, eventualmente frações de raízes e partículas de terra a eles aderida. Material este que começa a ser utilizado, conjuntamente com o bagaço, na co-geração de energia elétrica, nas usinas e destilarias, ou também para a fabricação do álcool.

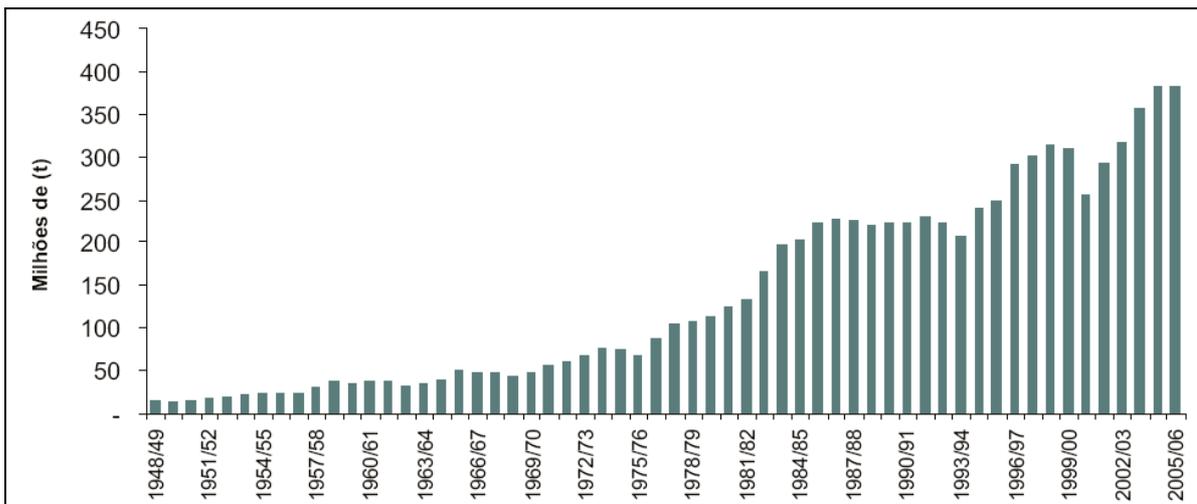


Figura 3 - Evolução da produção brasileira de cana-de-açúcar (fonte: BRASIL, 2007a).

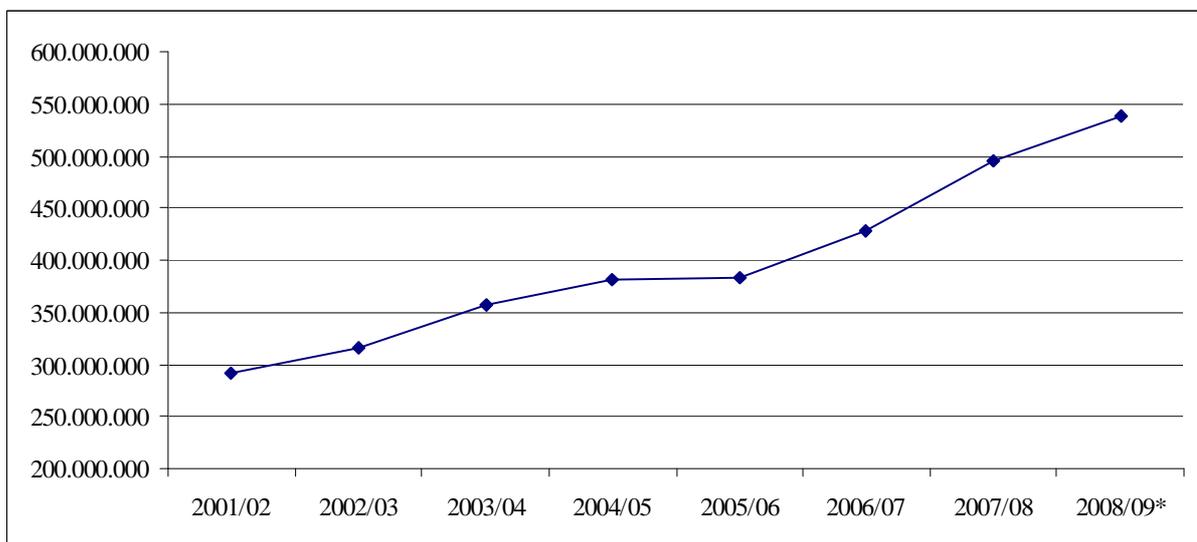


Figura 4 - Produção brasileira de cana-de-açúcar referente às ultimas safras em toneladas (fonte: MAPA, 2009).

A cana-de-açúcar constitui-se na principal cultura cultivada no Estado de São Paulo, participando com, aproximadamente, 27% do valor da produção agropecuária utilizando, apenas, 15% da área agrícola do Estado (RIPOLI; RIPOLI, 2004).

Embora quase todos os estados brasileiros produzam cana-de-açúcar, o maior produtor é o Estado de São Paulo, com cerca de 64% da produção nacional (MAPA, 2009), como mostra a Tabela 2.

\* Posição em 01/02/2009.

**Tabela 2** - Safra de 2008/2009 referente aos principais Estados produtores de cana, álcool e açúcar (fonte: MAPA, 2009\*).

<b>Região</b>	<b>Estados</b>	<b>Cana moída (t)</b>	<b>Álcool (m<sup>3</sup>)</b>	<b>Açúcar (t)</b>
Centro-Sul	São Paulo	337.859.916,00	16.622.303,00	19.932.605,00
	Minas Gerais	41.483.920,00	2.177.168,00	2.230.876,00
	Paraná	36.813.045,00	1.923.767,00	2.284.586,00
Total	C-S	482.894.526,00	24.687.690,00	26.754.538,00
Norte-Nordeste	Alagoas	18.339.704,00	550.936,00	1.523.274,00
	Pernambuco	13.017.940,00	342.007,00	1.081.927,00
	Paraíba	4.428.448,00	313.560,00	110.069,00
Total	N-NE	46.239.533,00	1.765.114,00	3.086.031,00
Total	Brasil	529.134.059,00	26.452.804,00	29.840.569,00

A participação da cana-de-açúcar no setor energético leva em consideração não somente o álcool consumido pelos veículos automotores, mas também a utilização do bagaço nas usinas.

O bagaço é o resíduo sólido gerado durante a extração do caldo da moagem da cana-de-açúcar para a produção de açúcar e álcool. Sua composição química varia conforme a espécie de cana-de-açúcar cultivada, os tipos de herbicidas e de fertilizantes e os fatores naturais como clima, solo e água (CORDEIRO, 2006).

Os principais resíduos sólidos do setor sucro-alcooleiro são a palha da cana, o bagaço da cana, a cinza do bagaço de cana, sendo classificados quanto à natureza como classe II; e as embalagens de defensivos agrícolas, sendo classificadas como classe I em função dos componentes químicos presentes (FIESP/CIESP, 2001).

O bagaço pode ser transformado em bagaço hidrolisado para alimentação animal (RIPOLI; RIPOLI, 2004) ou pode ser queimado na caldeira, juntamente com o palhiço ou palha da cana, no processo de co-geração de energia elétrica (FIESP/CIESP, 2001, PINTO, 1999, RIPOLI; RIPOLI, 2004). Para Embrapa Gado de Corte (2002), o bagaço representa aproximadamente 30% da cana integral moída.

\* Posição em 16/01/2009.

Muitas usinas e destilarias usam a vinhaça, também conhecida como vinhoto, nos canaviais, através da ferti-irrigação (PINTO, 1999, FIESP/CIESP, 2001).

Tendo em vista a geração destes resíduos, alguns trabalhos têm sido realizados para aproveitar o bagaço de cana (BILBA; ARSENE; OUENSANGA, 2003, MONTEIRO et al., 1998), a cinza do bagaço de cana (BAGUANT, 1995, CORDEIRO et al., 2008, PAYÁ et al., 2002, SANTOS; FORMAGINI, 2008, SINGH, SINGH, RAI, 2000, entre outros) e a cinza da palha da cana (FRÍAS, et al., 2005, FRIAS; VILLAR-COCIÑA; VALENCIA-MORALES, 2007; MARTIRENA-HERNÁNDEZ et al., 2000, 2001, VILLAR-COCIÑA et al., 2003), buscando novas soluções que possam agregar valor aos resíduos.

### ***3.2 Cinza do bagaço de cana-de-açúcar***

O bagaço é queimado em caldeiras, através de um sistema denominado co-geração\*, Este processo consiste na produção de vapor que será fornecido às turbinas de acionamento mecânico, como bombas, moendas, desfibriladores e, também, para os geradores de energia elétrica; e a demanda no processamento do caldo é suprida pelo vapor que sai das turbinas, denominado vapor de escape (FIOMARI, 2004).

A energia elétrica produzida pode atender parte ou a totalidade das necessidades da própria usina possibilitando sua auto-suficiência e ainda gerar excedentes exportáveis às concessionárias de energia.

A co-geração adquiriu importância nos anos 80, embora os sistemas da época fossem considerados ineficientes já que as turbinas utilizadas geravam energia elétrica somente para consumo próprio, e os parâmetros de trabalho do vapor gerado pelas caldeiras eram de 2156 KPa de pressão e 290°C de temperatura (FIOMARI, 2004).

---

\* Termo de origem americana, empregado para designar os processos de produção combinada de energia térmica e potência, mecânica ou elétrica, com o uso da energia liberada por uma mesma fonte primária de combustível, qualquer que seja o ciclo termodinâmico (FIOMARI, 2004).

Com a possibilidade de exportação de energia elétrica, além competitividade do mercado, as usinas passaram a se preocupar com a eficiência das suas máquinas térmica, fazendo-se necessário uma modernização do seu parque industrial. E, para atender as necessidades técnicas de tais máquinas, o níveis de pressão e de temperatura do vapor gerado pelas caldeiras tiveram que ser alterados para 4214 KPa e 420°C, respectivamente (FIOMARI, 2004).

Cordeiro (2006) relata que quanto maior a temperatura no interior do salão da caldeira e/ou do tempo de exposição ao calor, maior quantidade de carbono é liberada, gerando cinzas com diferentes colorações A Figura 5 mostra o bagaço e as cinzas produzidas nas caldeiras com tons mais escuros que caracterizam cinzas com alto teor de carbono e com tons mais brancos que indicam a combustão completa.



(a)

(b)

(c)

(d)

**Figura 5** - 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 a combustão completa (d) (fonte: CORDEIRO, 2006).

A calcinação do bagaço nas caldeiras resulta em uma cinza pesada e uma cinza volante, que embora não sejam liberadas diretamente no ar podem poluir o ambiente quando descartadas de forma imprópria após a limpeza das caldeiras da usina (BORLINI et al., 2006).

Para a estimativa de geração de resíduos, FIESP/CIESP (2001) adotaram-se as seguintes proporções: para cada tonelada de cana produzida, são gerados 260 kg de resíduo seco de bagaço; e cada tonelada de bagaço que alimenta as caldeiras das usinas, considerando seu percentual de uso em 95%, gera 23,8 kg de cinza de bagaço de cana-de-açúcar. Esta,

juntamente com as tortas de filtros e com a palha é encaminhada para a adubação nas próprias lavouras, apesar de ser um material pobre em nutrientes minerais.

Deste modo, a safra nacional de 2008/2009 produziu 529,9 milhões de toneladas de cana, e só no Estado de São Paulo, foram produzidas 337,8 milhões de toneladas de cana. Nas caldeiras de todo o país foram utilizadas 130,8 milhões de toneladas de bagaço e 83,4 milhões de toneladas de cana em São Paulo, o que gerou um montante de 3,11 milhões e 1,98 milhões de toneladas de cinza do bagaço de cana, no Brasil e em São Paulo, respectivamente.

No Brasil, alguns dos trabalhos sobre cinza do bagaço de cana-de-açúcar que merecem destaque foram desenvolvidos por Borlini et al. (2006); Caldas et al. (2000), Cordeiro (2006), Cordeiro et al. (2008), Freitas (2005), Mesa Valenciano e Freire (2004), Paula (2006), Santos e Formagini (2008).

Mesa Valenciano e Freire (2004) aplicaram a cinza do bagaço, fornecida pela Usina Furlan em Santa Bárbara D'Oeste - SP, em misturas de solo-cimento. A cinza foi submetida à moagem em moinho de bolas por três horas. Seus resultados indicaram que a incorporação de 3% de cimento ou sua substituição parcial por 20% de cinza de bagaço de cana-de-açúcar em misturas de solo-cimento-cinza aumentou a resistência à compressão simples de ambos os solos aos 60 dias de idade.

Borlini et al. (2006) incorporaram cinza do bagaço de cana-de-açúcar proveniente da região de Campos de Goytacazes - RJ na cerâmica vermelha. Seus resultados indicaram 10% de incorporação de cinza na massa de cerâmica atuou no sentido de fechar a porosidade aberta e a incorporação de até 10%, sinterizada a 1200°C, não mudou a resistência mecânica quando comparada à massa cerâmica.

Nos estudos de Baguant (1995), a cinza do bagaço de cana-de-açúcar, com temperatura de queima nas caldeiras em torno de 1000 a 1100°C, foi utilizada como agregado fino no concreto. Por demonstrar baixa reatividade química com cimento, com índice de atividade pozolânica de 65 a 68%, o autor concluiu que a cinza do bagaço de cana-de-açúcar era pouco eficiente como pozolana.

### 3.2.1 Composição Química

A cinza do bagaço de cana-de-açúcar apresenta uma grande quantidade de dióxido de silício, normalmente acima de 60%, em massa; este silício é proveniente da absorção das raízes na forma de ácido monossílico ou mesmo da areia (quartzo) oriunda da lavoura que não foi totalmente removida na lavagem da cana-de-açúcar (CORDEIRO, 2006).

A Tabela 3 compara os teores de sílica da cinza do bagaço de cana-de-açúcar encontrados na bibliografia pesquisada. Analisando as composições químicas das cinzas, observa-se que há certa homogeneidade com relação aos teores de SiO<sub>2</sub>. Entretanto, as diferenças entre as cinzas ocorrem nas características mineralógicas, ou seja, na forma com que a sílica se encontra: cristalina ou amorfa.

**Tabela 3** - Teor de sílica na CBC, segundo diversos autores.

<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	Mauritius	73,10
Martirena-Hernández et al.	1998	Villa Clara	Cuba	72,74
Singh; Singh; Raí	2000	Captainganj, District Kushinagar	Índia	63,16
Payá et al.	2002	Valle del Cauca	Colômbia	59,87
Zardo et al.	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 et al.	2006	Campos dos Goytacazes, RJ	Brasil	77,50
Mu'Azu	2007	Não mencionado	Nigéria	57,95
Ganesan; Rajagopal; Thagavel	2007	Aranthangi, TamilNadu	Índia	64,15
Santos; Formagini	2008	Sidrolândia, MS	Brasil	83,80

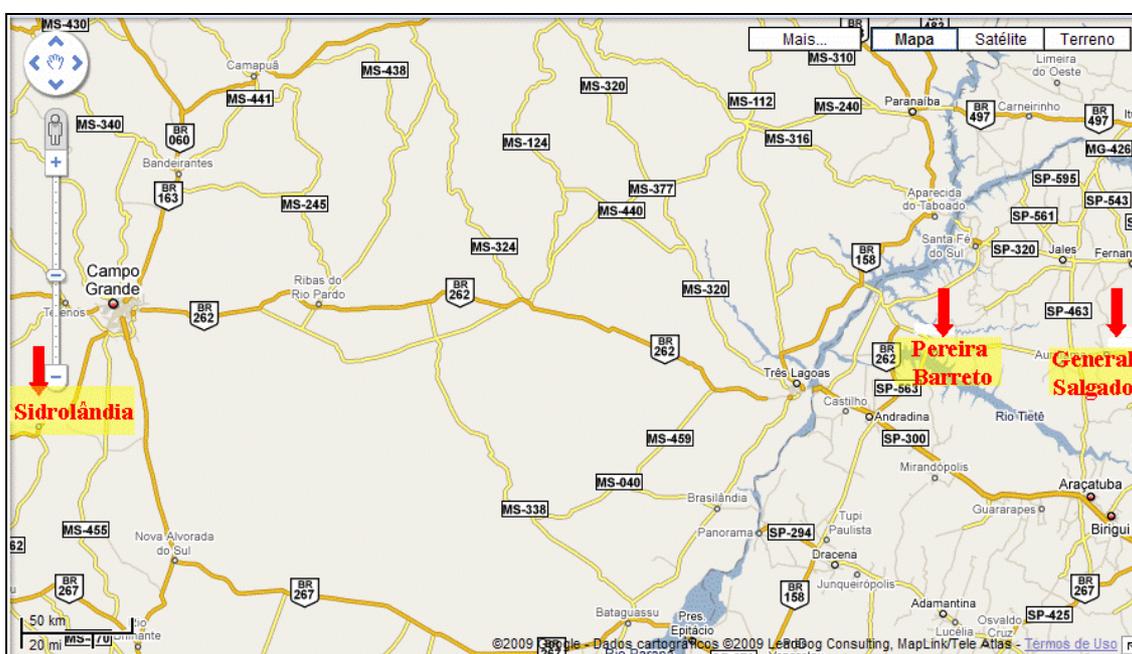
Dentre os locais de coleta das cinzas, Sidrolândia é o município que mais se aproxima da região de onde foram coletadas as cinzas usadas neste trabalho. Por esta razão, consta na Tabela 4 a caracterização química da cinza do bagaço de cana-de-açúcar pesquisada por Santos

\* Foi utilizado o valor da cinza proveniente da Usina COAGRO *in natura*, ou seja, sem calcinar o bagaço de cana em laboratório, já que o autor fez um estudo com diferentes tempos e temperaturas de calcinação das cinzas.

e Formagini (2008) e que foi coletada na Usina Santa Olinda do Grupo José Pessoa, localizada no município de Sidrolândia – MS e. A Figura 6 mostra a proximidade entre este município e a região destacada no mapa, composta pelos municípios de Pereira Barreto, Sud Menucci, General Salgado, de onde foram coletadas as cinzas usadas neste trabalho.

**Tabela 4** - Composição química da cinza do bagaço de cana (fonte: SANTOS; FORMAGINI, 2008).

Composição química (%)							
SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO	MgO	SO <sub>3</sub>	Perda ao fogo	Umidade
83.80	1.14	1.14	0.38	0.35	0.09	8.02	1.00



**Figura 6** - Mapa da região de onde foram coletadas as cinzas utilizadas para a caracterização química deste trabalho, incluindo a localidade da cinza estudada por Santos, Formagini (2008).

A sílica deve estar no estado amorfo, isto é vítreo, pois quando cristalina, sua reatividade é muito pequena (NEVILLE, 1997).

Em resíduos agrícolas queimados, com propriedades pozolânicas reconhecidas, a atividade pozolânica depende principalmente da temperatura de combustão, que deve oscilar entre 400 a 800°C (MEHTA, MALHOTRA apud MARTIRENA-HERNÁNDEZ et al., 2000) para evitar a formação de fases cristalinas da sílica em altas temperaturas de combustão (MARTIRENA-HERNÁNDEZ et al., 1998).

A cinza de resíduos agrícolas deve ser produzida com temperatura de queima abaixo de 700°C por uma hora para que o conteúdo de sílica da cinza se transforme em fase amorfa, (MOAYAD et al., 1984, JAMES, 1986 citados por GANESAN; RAJAGOPAL; THANGAVEL, 2007).

Payá et al. (2002) compararam o desempenho de cinzas de bagaço de cana-de-açúcar coletadas da usina Ingenio Providencia, na Colômbia com as cinzas de bagaço de cana-de-açúcar queimadas em laboratório usando técnicas de termogravimetria. As cinza coletadas da usina tiveram temperatura de queima superior a 800°C enquanto que as cinzas queimadas em laboratório tiveram temperatura de queima a 600°C por uma hora. Seus resultados mostraram que a cinza sob condições laboratoriais, fixou mais hidróxido de cálcio do que a cinza coletada da usina, isto porque a baixa temperatura de queima da cinza de laboratório disponibilizou mais sílica e alumina reativas para reagir com a cal.

Nos estudos de Ganesan, Rajagopal e Thangavel (2007), a cinza do bagaço de cana-de-açúcar foi queimada à temperatura controlada de 650°C durante uma hora; a difração de raios-X mostra a presença sílica amorfa com desvio da linha de base em torno de 22° (2θ), além da presença de pequenas quantidades de fases cristalinas como quartzo e cristobalita.

Para Caldas et al. (2000) deve ser dada atenção especial ao percentual de álcalis solúveis, como K<sub>2</sub>O e Na<sub>2</sub>O encontrados nas cinzas, pois podem inviabilizar seu emprego.

### **3.2.2 Perda ao fogo**

A perda ao fogo, no caso de aditivos minerais, geralmente é atribuída à quantidade de carbono porque a umidade e os materiais voláteis já foram eliminados após a queima, restando apenas matéria orgânica na forma de carbono livre, segundo Fuad et al. citado por Cordeiro (2006).

A quantidade de carbono tem grande influência na absorção de água, pois o material carbonoso é extremamente fino, ocasionando um aumento na demanda de água (TASHIMA, 2006, GAVA, 1999).

Martirena-Hernández et al. (1998) estudaram os produtos da reação de hidratação de pastas de cal-pozolana, usando cinza de bagaço de cana-de-açúcar e cinza de palha de cana-de-açúcar como pozolana. Constatou-se que impurezas como carbono e material não calcinado reduzem a reatividade da cinza por limitar o contato do hidróxido de cálcio com a sílica reativa para formar compostos estáveis.

### **3.2.3 Moagem e finura**

Segundo Cordeiro (2006), a cominuição de materiais cimentícios e aditivos minerais é uma operação necessária para ativar suas reações químicas, cujas taxas são diretamente proporcionais à superfície específica do material e para conferir maior compacidade à mistura.

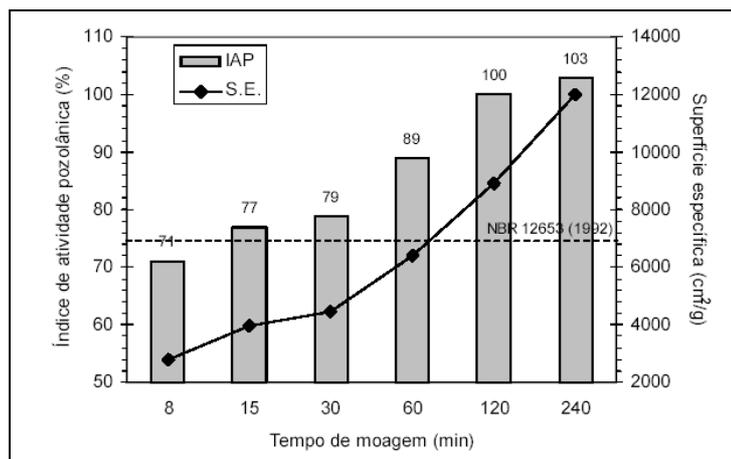
Para Isaia apud Gava (1999), a reatividade do material não está relacionada apenas com seu grau de amorfismo, mas principalmente com a quantidade de pozolana e com o teor de partículas finas.

A área de contato do sólido com o meio aquoso é fundamental na taxa de reação e de precipitação de produtos hidratados, pois o aumento na área de superfície resulta em um aumento na velocidade de ganho da resistência mecânica (PAULA, 2006).

Freitas (2005) verificou que a moagem da cinza aumenta a uniformidade dos grãos; proporcionando maior superfície de contato dos grãos da cinza do bagaço de cana e aumentando a reatividade do material, o que favorece o efeito fíler.

De acordo com Neville (1997), é fundamental que a pozolana seja finamente subdividida, pois somente assim a sílica pode combinar com o hidróxido de cálcio na presença de água para formar silicatos estáveis que têm propriedades cimentíceas.

Nos estudos de Cordeiro et al. (2004) foi observado um aumento da reatividade da cinza de bagaço de cana-de-açúcar, analisada através do índice de atividade pozolânica, em função do aumento do tempo de moagem e do aumento da superfície específica, como pode ser visto na Figura 7.



**Figura 7** - Variação do índice de atividade pozolânica com cimento Portland (IAP) em função do tempo de moagem e superfície específica. (fonte: CORDEIRO et al, 2004).

As cinzas são higroscópicas por natureza e a superfície específica da cinza do bagaço é três vezes maior que a do cimento, necessitando maior quantidade de água para obter consistência apropriada (GANESAN; RAJAGOPAL; THANGAVEL, 2007).

Entretanto, a eficiência do aumento de finura decresce a partir de certo ponto por diversos fatores. As partículas menores, de elevada superfície específica, tendem a aglomeração ainda no estado seco, o que exige energia de mistura elevada, incompatível com os equipamentos hoje existentes ou emprego de aditivos para aumentar a dispersão (PAULA, 2006).

Como as partículas menores são mais resistentes e tendem a deformar-se plasticamente, a moagem de materiais a tamanhos reduzidos é uma tarefa muito difícil (CORDEIRO et al., 2004). Além disto, a possibilidade de ocorrer choques entre as partículas de material e os corpos moedores é reduzida (AUSTIN; CONCHA apud CORDEIRO, 2006).

### 3.2.4 Interação na matriz cimentícia

O conhecimento da interação entre as adições minerais, neste caso, a CBC, e o cimento Portland é de fundamental importância, pois as adições interferem nas propriedades da pasta em decorrência das reações entre os silicatos amorfos e o hidróxido de cálcio e da ação de

empacotamento (efeito fíler), de nucleação e de diluição do cimento Portland pelas partículas finas da adição (CORDEIRO, 2006).

Singh et al. (2000), Ganesan, Rajagopal e Thangavel (2007) verificaram que os tempos inicial e final de pega aumentam com o aumento do teor de CBC em substituição da massa de cimento. Singh et al. (2000) concluíram que o aumento do teor de CBC, que demanda maior adsorção de água e a redução do teor de cimento podem ser responsáveis por retardar a pega.

Através de termogravimetria, difração de raios X e microscopia eletrônica de varredura, Martirena-Hernández et al. (2001) confirmaram a formação de compostos estáveis – silicatos de cálcio hidratado e o consumo de hidróxido de cálcio durante a reação pozolânica nas pastas contendo CBC.

Payá et al. (2002), através de estudos de termogravimetria em pastas de cimento/CBC e de cal/CBC, verificaram que a CBC do Valle del Cauca, Colômbia, apresenta alta atividade pozolânica, com a formação de silicatos de cálcio hidratado, aluminatos de cálcio hidratado e sílico-aluminatos de cálcio hidratado, embora tenha elevada quantidade de carbono e cristalinidade.

### **3.2.5 Resistência mecânica**

Vários estudos realizados com a cinza do bagaço de cana-de-açúcar mostram que ocorre um aumento na resistência à compressão de argamassas até certo limite de adição da cinza devido à reação pozolânica e à elevada superfície específica da cinza do bagaço que leva a pontos de nucleação para os produtos da reação de hidratação.

Os resultados obtidos por Singh, Singh e Rai (2000) mostraram que argamassa contendo 10% de cinza do bagaço de cana-de-açúcar em relação ao cimento apresentou um ganho de resistência superior ao da argamassa controle em todas as idades, sendo este valor de adição da cinza considerado o limite ótimo.

### 3.2.6 Durabilidade

A durabilidade do concreto pode ser definida pelo Comitê 201 de ACI (2002) como a habilidade em resistir à ação do tempo, ao ataque químico, à abrasão e a qualquer outro processo de deterioração.

Os critérios utilizados para avaliar a durabilidade do material devem levar em conta não somente a resistência mecânica, mas também os processos de deterioração. Estes processos estão associados a fenômenos físico-químicos entre os constituintes do concreto e os agentes agressivos, em geral, na presença de água, tais como o ingresso de cloretos e sulfatos, ciclos de molhagem-secagem, carbonatação, reação álcali-agregado, entre outros.

A durabilidade está intimamente ligada ao movimento de gases, líquidos e íons no interior do concreto, através de sua estrutura porosa por meio de mecanismos como a absorção e a capilaridade.

A intensidade, velocidade e frequência que ocorrem os processos de deterioração da estrutura são determinadas pela facilidade com que os agentes agressivos penetram e movimentam-se pela rede de poros do concreto (MENOSSI, 2004). Desta forma, a avaliação do índice de vazios e da absorção de água por capilaridade torna-se relevante na estimativa da durabilidade do material.

Embora a adição de cinza ultrafina de bagaço da cana estudada por Cordeiro (2006) não promova alterações expressivas no índice de vazios, ao final de 68 dias é significativamente menor o ingresso de água nos concretos com cinza ultrafina, avaliado pela absorção de água por capilaridade.

A cinza de bagaço de cana-de-açúcar utilizada por Caldas et al. (2000) mostrou comportamento semelhante à cinza de casca de arroz - material de reconhecida atividade pozolânica – tendo aumento da resistência à compressão para valores até 5% de adição além da redução da absorção com o aumento do teor de cinza e do aumento da compacidade da argamassa para todas as idades e teores de cinza.

Singh, Singh e Rai (2000) também analisaram a deterioração química causada por ácido sulfúrico ( $H_2SO_4$ , N/60), medida por meio de expansões em prismas. Eles verificaram que as expansões nas pastas contendo 10% de cinza do bagaço de cana-de-açúcar foram significativamente menores do que as expansões ocorridas nas pastas controle. Esta melhora na resistência aos ácidos foi atribuída à reação pozolânica com o hidróxido de cálcio e à redução da permeabilidade ocorrida pela presença da cinza do bagaço de cana.

Os resultados do ensaio de penetração acelerada de íons cloreto com pastas de cimento realizado por Ganesan, Rajagopal e Thangavel (2007) mostram que a carga total passante, em Coulomb, diminui com o aumento do teor de substituição de cimento por cinza do bagaço de cana-de-açúcar, comprovando que a adição da cinza proporciona bom comportamento frente à penetração de íons cloreto.

Como as adições minerais normalmente reduzem a exsudação, o que dificulta a subida de água até a superfície, existe um potencial de risco de fissuração em decorrência da retração por secagem, particularmente quando estas adições são empregadas em teores mais elevados e quando a taxa de evaporação de água é mais intensa (SILVA, M., 2007).

## **4 PROGRAMA EXPERIMENTAL**

---

“Sendo a vez e sendo a hora, entende, atende, tome tento, peleja e faz”. João Guimarães Rosa

## ***4.1 Introdução***

Neste capítulo são descritos o material e o método empregados para o desenvolvimento desta pesquisa. O primeiro programa de ensaios refere-se à coleta e à caracterização da cinza do bagaço, fornecendo dados que serviram para a escolha da cinza usada nesta pesquisa.

O segundo programa de ensaios diz respeito à moagem da cinza de bagaço de cana escolhida, bem como os ensaios relacionados – superfície específica, granulometria a laser, finura na peneira #325 e atividade pozolânica com cal e com cimento.

O terceiro programa de ensaios trata da investigação do comportamento mecânico de argamassas com substituição, em massa, de parte do agregado miúdo por cinza do bagaço de cana-de-açúcar nas porcentagens de 0, 3, 5, 8 e 10%.

## ***4.2 Material***

### **4.2.1 Cimento**

Como este trabalho investiga o uso de uma adição mineral, através da substituição de areia por CBC, o ideal é a escolha de um cimento sem adições para qualificar melhor a reatividade do material. Deste modo, o cimento utilizado foi o CPV-ARI-Plus Holcim - Cimento Portland de Alta Resistência Inicial que embora possua baixo teor de adição em sua composição (Tabela 5) pode ser encontrado mais facilmente no mercado do que o CPI, que é o cimento sem adições, como mostra a Tabela 6, referente à produção anual de cimento.

**Tabela 5** - Composição dos cimentos comercializados no Brasil (fonte: ABCP, 2002).

Tipo de cimento Portland	Sigla	Norma Brasileira	Composição (% em massa)			
			Clínquer + gesso	Escória granulada de alto-forno	Material Pozolânico	Material Carbonático
Comum	CP I	NBR 5732	100		0	
	CP I-S		99-95		1-5	
Composto	CP II-E	NBR 11578	94-56	6-34	0	0-10
	CP II-Z		94-76	0	6-14	0-10
	CP II-F		94-90	0	0	6-10
Alto-forno	CP III	NBR 5735	65-25	35-70	0	0-5
Pozolânico	CP IV	NBR 5736	85-45	0	15-50	0-5
Alta resistência inicial	CP V-ARI	NBR 5733	100-95	0	0	0-5

**Tabela 6** - Produção anual de cimento Portland (fonte: SNIC, 2006).

Ano	Tipos de cimento (em mil toneladas)						Subtotal (em mil toneladas)	Ajustes*	Total
	CP I	CP II	CP III	CP IV	CP V	Branco			
2001	441	29493	3044	2981	2979	49	38987	466	39453
2002	441	28619	3287	2892	2788	71	38098	829	38927
2003	643	24392	4424	2581	1970	80	34090	1032	35122
2004	683	23829	5155	2794	1952	87	34500	1484	35984
2005	786	24780	6522	2545	2040	96	36769	1936	38705
2006	794	26621	6843	2846	2436	93	39633	2241	41874

A caracterização físico-química do cimento CPVARI Plus da Holcim encontra-se na Tabela 7.

\* Dados estimados.

**Tabela 7 - Caracterização físico-química do cimento utilizado.**

<b>Referência</b>		<b>23068</b>	<b>Especificações</b>		
<b>Amostra</b>		<b>63</b>	<b>NBR-5733</b>		
<b>Data da coleta</b>		<b>26.03.2008</b>	<b>min.</b>	<b>máx.</b>	
Finura Peneira 200 (% retida)		1,53	-	6,0	
Finura Peneira 325 (% retida)		6,14	-	-	
Superfície específica Blaine (cm <sup>2</sup> /g)		3766	3000	-	
Densidade aparente (g/cm <sup>3</sup> )		1,05	-	-	
Densidade absoluta (g/cm <sup>3</sup> )		3,03	-	-	
Água de consistência da pasta	gramas	152	-	-	
	(%)	30,4	-	-	
Início de pega (h:min)		02:05	01:00	-	
Expansão em auto-clave (%)		0,016	-	-	
Consistência	gramas	150	-	-	
	argamassa a / c	0,48	-	-	
Resistência à Compressão	Data de moldagem	01.04.2008	-	-	
	Axial	03 dias	38,7	24,0	
	Tensão (MPa)	07 dias	39,8	34,0	-
		28 dias	51,7	-	-
Perda ao fogo		4,07	-	4,5	
Insolúveis		0,24	-	1,0	
SiO <sub>2</sub>		18,16	-	-	
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>		2,57	-	-	
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>		7,01	-	-	
CaO		62,95	-	-	
MgO		0,7	-	6,5	
SO <sub>3</sub>		3,11	-	3,5	
Na <sub>2</sub> O		0,18	-	-	
K <sub>2</sub> O		0,77	-	-	
Equiv alcalino Na <sub>2</sub> O		0,69	-	-	
Cal livre em CaO		1,67	-	-	

### 4.2.2 Agregado miúdo

Areia normal, fornecida pelo Instituto de Pesquisas Tecnológicas - IPT, foi empregada na realização dos ensaios de atividade pozolânica com cal e com cimento e retração por secagem, conforme os critérios da ABNT (1982) através da NBR 7214.

Areia natural proveniente de Porto de Areia São Judas Tadeu, em Castilho-SP, para todos os outros ensaios. Para a sua utilização adequada, a secagem da areia foi realizada em temperatura ambiente e exposta ao sol, seguida do seu resfriamento à temperatura ambiente dentro de tambores para mantê-la isolada da umidade e de fontes de calor.

A caracterização do agregado miúdo baseou-se nos ensaios de granulometria pela NBRNM 248 (ABNT, 2003), absorção de água seguindo NBRNM 30 (ABNT, 2001), massa específica e massa específica aparente conforme NBRNM 52 (ABNT, 2003), massa unitária segundo NBRNM 45 (ABNT, 2006) e materiais pulverulentos pela NBRNM 46 (ABNT, 2003). A caracterização bem como a curva granulométrica da areia natural encontra-se na Tabela 8 e Figura 8, respectivamente.

**Tabela 8** - Caracterização granulométrica do agregado miúdo.

$\phi$ máx. (mm)	Módulo de finura	Massa específica			Massa unitária		Absorção (%)	Material pulverulento (%)	Matéria orgânica
		s.s.s. (g/cm <sup>3</sup> )	seca (g/cm <sup>3</sup> )	aparente (g/cm <sup>3</sup> )	solta (g/cm <sup>3</sup> )	4% de umidade (g/cm <sup>3</sup> )			
4,75	2,66	2,630	2,646	2,622	1,549	1,179	0,30	0,78	+clara

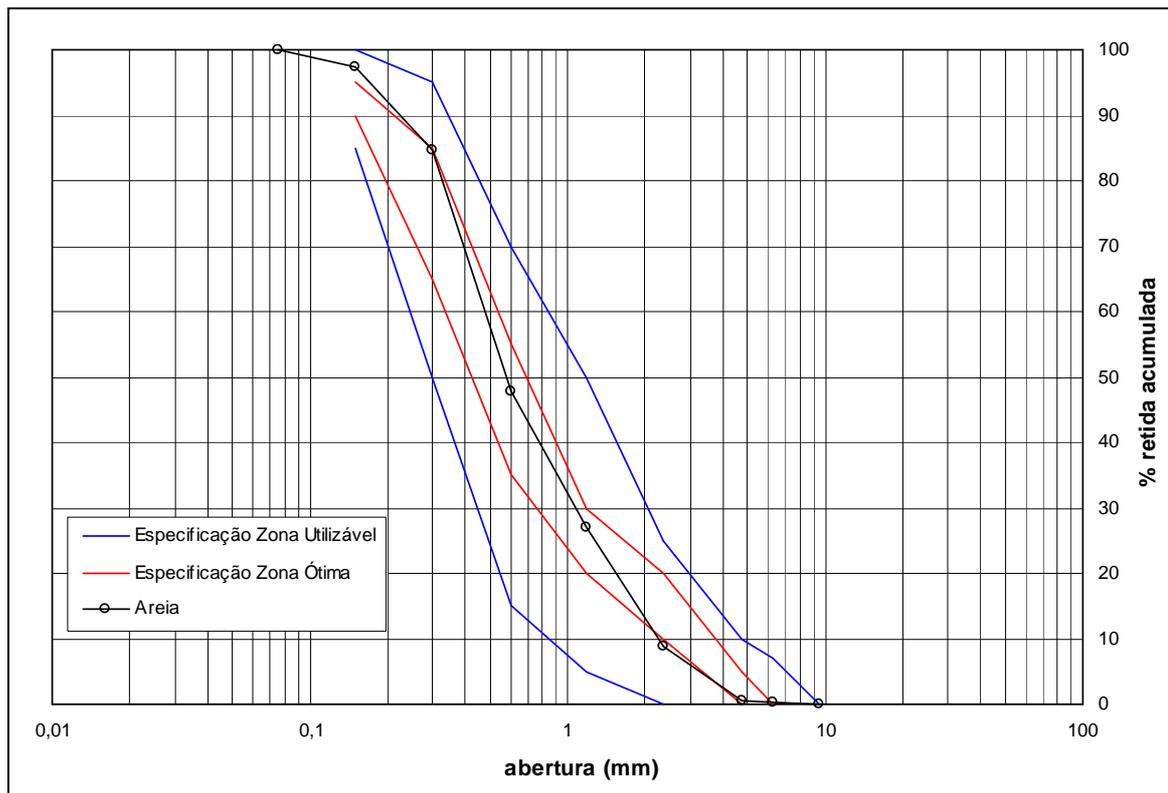


Figura 8 - Curva granulométrica do agregado miúdo.

### 4.2.3 Agregado graúdo

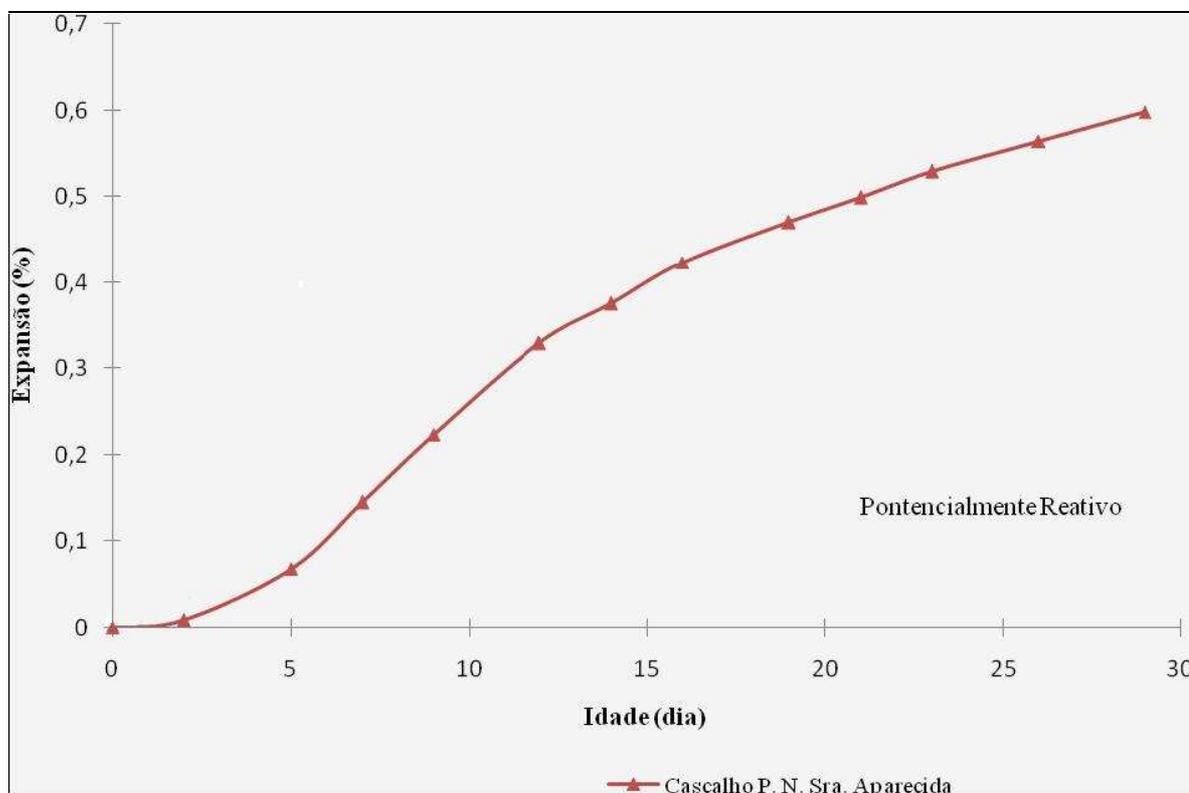
O seixo rolado, procedente do Porto Nossa Senhora Aparecida de Três Lagoas-MS, foi empregado no ensaio de reatividade acelerada. Este mesmo agregado foi utilizado por Silva, D. (2007), cuja caracterização encontra-se na Tabela 9.

Tabela 9 - Caracterização do agregado graúdo (fonte: Silva, D., 2007).

$\phi$ (mm)	Módulo de finura	Massa específica s.s.s. (g/cm <sup>3</sup> )	Absorção (%)
25	7,10	2,631	0,36

Em seus estudos, Silva, D. (2007) comprovou que o agregado em questão apresenta um comportamento deletério segundo American Society for Testing and Materials - ASTM C-1260 (2005), com expansão superior a 0,200% aos 16 dias de idade (Figura 9). Todavia, se

este agregado for comparado com os parâmetros da NBR 15577 (ABNT, 2008) também pode ser considerado deletério por obter expansão superior a 0,190% aos 30 dias de idade.



**Figura 9** - Comportamento expansivo de barras de argamassa contendo agregado procedente do Porto de Areia Nossa Senhora Aparecida (fonte: SILVA, D., 2007).

#### 4.2.4 Cal

O hidróxido de cálcio foi empregado na confecção das argamassas destinadas à determinação dos valores de índice de atividade pozolânica com cal. Para tal, foi utilizado o hidróxido de cálcio com massa específica de 2,26 g/cm<sup>3</sup>.

#### 4.2.5 Água

A água utilizada na confecção das argamassas foi proveniente do sistema de abastecimento da cidade de Ilha Solteira –SP.

#### 4.2.6 Impermeabilizante

Na realização do ensaio de absorção por capilaridade, aplicou-se impermeabilizante Imperflon BN Neutro nos corpos-de-prova antes de sua imersão em água.

#### 4.2.7 Aditivo superplastificante

Para a moldagem das argamassas, fez-se o uso de aditivo superplastificante com o intuito de manter fixa consistência (flow) em todos os traços sem alterar a relação água/cimento. O aditivo redutor de água escolhido foi SikaViscocrete 20HE, do fabricante SIKA, que é um aditivo líquido de pega normal de terceira geração. A dosagem recomendada pelo fabricante para concreto plástico é de 0,2 a 0,90% sobre o peso de cimento. Segundo SIKA (2006), as características do aditivo encontram-se na Tabela 10.

**Tabela 10** - Características do aditivo superplastificante SikaViscocrete 20HE (fonte: SIKA, 2006)

Características	
Composição básica	Solução de policarboxilato em meio aquoso
Aspecto	Líquido
Cor	Castanho
Densidade a 25°C	1,00 a 1,15 kg/l
pH	4-5

#### 4.3 Método

Como os resultados encontrados não foram esperados conforme a bibliografia pesquisada, foi necessário retroceder a etapas anteriores e refazer alguns ensaios para dar prosseguimento a este trabalho. O fluxograma da Figura 10 é elucidativo, apenas para facilitar o entendimento das etapas do programa experimental deste trabalho.

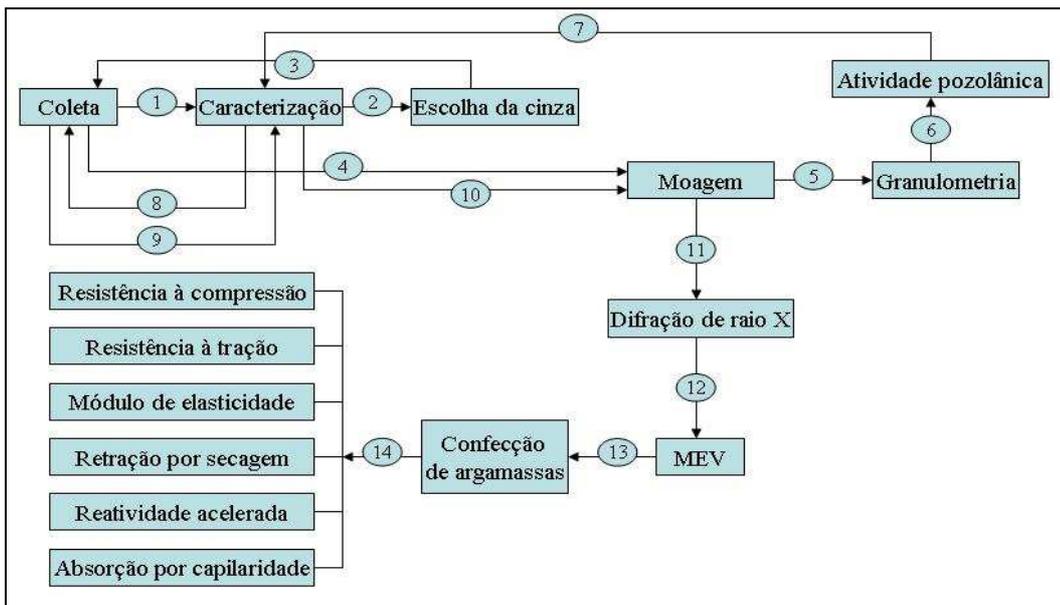


Figura 10 - Fluxograma das etapas do programa experimental deste trabalho.

### 4.3.1 Coleta da cinza de bagaço de cana-de-açúcar

Algumas amostras de cinza do bagaço de cana-de-açúcar (CBC) foram coletadas em pequena quantidade de usinas de cana-de-açúcar da região do noroeste paulista, denominadas CBC1, CBC2, CBC3, CBC4, CBC5, CBC6 em função dos locais de coleta. Posteriormente, foi escolhida uma cinza que obtivesse o melhor desempenho baseado nos parâmetros definidos pela NBR 12653 (ABNT, 1992) para classificação como pozolana. A Tabela 11 mostra o local de coleta das diferentes cinzas pesquisadas nesta primeira etapa do trabalho.

Tabela 11 - Local de coleta das cinzas pesquisadas.

Denominação	Local da coleta	Município
CBC1	Ponto 1 da lagoa de decantação da Usina Interlagos	Pereira Barreto - SP
CBC2	Ponto 2 da lagoa de decantação da Usina Interlagos	Pereira Barreto - SP
CBC3	Ponto 3 da lagoa de decantação da Usina Interlagos	Pereira Barreto - SP
CBC4	Lagoa de decantação da Pioneiros Bioenergia S/A.	Sud Mennucci - SP
CBC5	Lagoa de decantação da Destilaria Generalco S/A.	General Salgado - SP
CBC6	Base da caldeira da Destilaria Generalco S/A.	General Salgado - SP

As Figuras 11, 12, 13 e 14 mostram as cinzas (CBC1, CBC2 e CBC3) provenientes de diferentes pontos da lagoa de decantação da Usina Interlagos. As Figuras 15 e 16 indicam os locais de coleta das cinzas CBC5 e CBC6, respectivamente, da Destilaria Generalco S/A.

As cinzas CBC1, CBC2, CBC3, CBC4 e CBC5 possuem coloração escura e apresentam bastante umidade, pois foram coletadas da lagoa de decantação, já a CBC6 é uma cinza mais clara e seca que se acumula na base da caldeira, como se verifica na Figura 16.



**Figura 11** - Pontos 1, 2 e 3 de coleta das cinzas CBC1, CBC2 e CBC3, respectivamente, da lagoa de decantação da Usina Interlagos.



**Figura 12** - Localização do ponto 1 de coleta da cinza CBC1 da Usina Interlagos.



**Figura 13** - Localização do ponto 2 de coleta da cinza CBC2 da Usina Interlagos.



**Figura 14** - Localização do ponto 3 de coleta da cinza CBC3 da Usina Interlagos.



**Figura 15** - Lagoa de decantação da Destilaria Generalco S/A de onde é retirada a CBC5.



**Figura 16** - CBC6 retirada da base da caldeira da Destilaria Generalco S/A.

A Figura 17 mostra a mapa da região de onde foram coletadas as cinzas usadas para a caracterização química, sendo assinalados os respectivos municípios.



**Figura 17** - Mapa da região onde foram coletadas as cinzas usadas para a caracterização química.

As Figuras 18, 19, 20 e 21 mostram o processo de produção da CBC5, da Destilaria Generalco S/A, que foi a cinza escolhida para ser o objeto de estudo desta pesquisa conforme os parâmetros de composição química do material. A temperatura no interior da caldeira da usina varia em torno de 280 a 320°C.

O bagaço de cana-de-açúcar (Figura 18) é queimado em caldeiras (Figura 19), gerando a cinza do bagaço de cana-de-açúcar (CBC), que se mistura com a água no lavador de gases. Esta água, juntamente com a água da lavagem da cana (Figura 20), é levada para a lagoa de decantação (Figura 21), onde o líquido, ao ser separado das partes sólidas da cinza é reaproveitado pela usina.



**Figura 18** - Bagaço de cana que é utilizado para a produção de vapor.



**Figura 19** - Caldeiras para a queima do bagaço.



**Figura 20** - Mistura da água da lavagem da cana e da água do lavador de gases.



**Figura 21** - Água sendo levada para lagoa de decantação.

#### **4.3.2 Caracterização química da cinza do bagaço de cana-de-açúcar**

Após a coleta, efetuou-se a composição química da CBC, como é possível verificar na etapa 1 do fluxograma da Figura 10. Foi empregada análise quantitativa por espectrofotometria de absorção atômica, gravimetria e titulação e realizada pelo Laboratório CESP de Engenharia Civil.

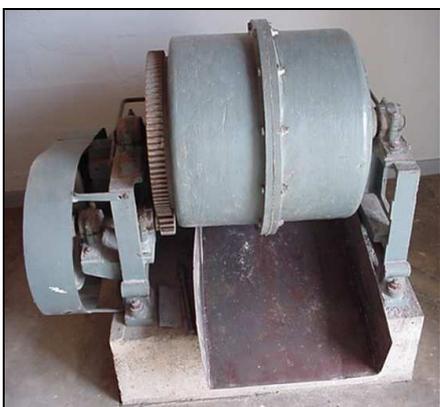
A partir de alguns dos parâmetros químicos, escolheu-se aquela cinza que apresentasse o melhor desempenho e então, uma nova coleta, em grande quantidade, foi realizada para dar continuidade ao programa de ensaios, conforme etapas 2 e 3, respectivamente do fluxograma da Figura 10.

### 4.3.3 Moagem

A etapa 4 do fluxograma da Figura 10 diz respeito ao estudo sobre a moagem em relação a finura da CBC, para definir o tempo ideal de moagem através de alguns ensaios efetuados:

- Massa específica, seguindo a NBRNM 23 (ABNT, 2003);
- Finura (% retida na peneira #0,045mm) pela NBR 12826 (ABNT, 1993);
- Superfície específica por Blaine, conforme NBRNM 76 (ABNT, 1998).

As cinzas foram homogeneizadas e, para a sua secagem, permaneceram em estufa por 24 horas à temperatura de 110 °C e mais 24 horas expostas ao sol. Em seguida, a cinza passou moagem em moinho de bolas utilizado para produção de cimentos (Figura 22), composto de 684 cilindros de aço cujo peso total está em torno de 52,5 kg (Figura 23). Foram moídos 5,0 kg cinza por vez em diferentes tempos de moagem: 20, 30, 40 e 50 minutos.



**Figura 22** - Moinho de bolas.



**Figura 23** – Cilindros de aço que compõem o moinho.

### *Índice de finura*

A NBR 12826 (ABNT, 1993) prescreve o método para a determinação do índice de finura do cimento Portland e outros materiais em pó, por meio da peneira 45 µm (# 325), acopladas em peneirador aerodinâmico. Este método indica resultados qualitativos por fornecer dados que mostram a uniformidade das partículas.

### ***Superfície específica***

A superfície específica é definida como a área superficial por unidade de massa, expressa em centímetros quadrados por grama. A finura do cimento é determinada como superfície específica, observando-se o tempo requerido para uma determinada quantidade de ar fluir através de uma camada de cimento compactada, de dimensões e porosidade especificadas, conforme a definição da NBRNM 76 (ABNT, 1998). Este é o denominado método de permeabilidade ao ar ou método de Blaine. A determinação da superfície específica serve principalmente para conferir a uniformidade do processo de moagem de uma fábrica (ABNT, 1998). No entanto, este método pode ser adaptado para as cinzas oriundas da casca de arroz e do bagaço de cana embora não conduza a resultados precisos em virtude da elevada porosidade das partículas (CORDEIRO, 2006).

#### **4.3.4 Distribuição granulométrica**

No estudo de variação da granulometria em função dos tempos de moagem da CBC (etapa 5 do fluxograma da Figura 10) foi empregado o método de análise granulométrica a laser realizado no Laboratório de Concreto de FURNAS Centrais Elétricas S.A. A importância deste ensaio está associada ao controle da redução e da distribuição do tamanho das partículas de cinza e à otimização do seu processo de moagem.

#### **4.3.5 Índice de Atividade Pozolânica**

A reatividade das cinzas para ser empregada como adição mineral foi estudada em função de cada tempo de moagem e avaliada através da determinação do índice de atividade pozolânica (IAP), referente à etapa 6 do fluxograma da Figura 10. Neste trabalho, determinou-se o índice de atividade pozolânica com cimento Portland, conforme a NBR 5752 (ABNT, 1992) e com cal, através da NBR 5751 (ABNT, 1992).

A norma estipula que, para ambos os ensaios de atividade pozolânica, a quantidade de água da mistura é aquela necessária para obter um índice de consistência fixo de  $225 \pm 5$  mm. Desta forma, é possível variar a trabalhabilidade da argamassa adicionando ou retirando água até atingir a faixa desejada.

### ***Índice de atividade pozolânica com cimento***

O índice de atividade pozolânica com cimento é calculado pela relação entre a resistência à compressão da argamassa A e da argamassa B, descrita pela Equação 4.

$$IAP_{\%} = \frac{f_{CP}}{f_{CC}} \times 100 \quad \text{Equação 3}$$

Onde:

$f_{cp}$  - resistência à compressão média, aos 28 dias, de três corpos-de-prova (CPs) moldados com cimento Portland e material pozolânico – argamassa A;

$f_{cc}$  - resistência à compressão média, aos 28 dias, de três corpos-de-prova moldados somente com cimento Portland como material cimentício – argamassa B.

A argamassa A deve ter substituição de 35% do volume de cimento por material pozolânico, neste caso a CBC, no traço 1:3 (cimento + pozolana : areia normal), em massa. A argamassa B deve conter somente cimento Portland, no traço 1:3 (cimento : areia normal), em massa.

A mistura dos materiais e a moldagem dos corpos-de-prova são feitas seguindo a NBR 7215 (ABNT, 1996). Para cada tempo de moagem são moldados três corpos-de-prova cilíndricos cujas dimensões são 5x10 cm.

Nas primeiras 24 horas de cura, os corpos-de-prova são mantidos nas formas em câmara úmida, sendo desmoldados após este período e colocados em recipientes hermeticamente fechados e estanques à temperatura de  $38 \pm 2^{\circ}\text{C}$ , em câmara quente, durante 27 dias.

Aos 28 dias de idade os corpos-de-prova são resfriados à temperatura ambiente, capeados com enxofre e ensaiados à compressão.

### ***Índice de atividade pozolânica com cal***

O índice de atividade pozolânica com cal é dado pela média da resistência à compressão, expresso em MPa, de três corpos-de-prova moldados com argamassa contendo hidróxido de cálcio, areia normal e material pozolânico.

A argamassa é preparada no traço 1:9 (hidróxido de cálcio: areia normal), em massa, mais uma quantidade de material pozolânico, neste caso CBC, que corresponda ao dobro do volume de hidróxido de cálcio.

São moldados três corpos-de-prova de acordo com a NBR7215 (ABNT, 1996) e a cura se dá em duas etapas: nas primeiras 24 horas, nos moldes, à temperatura de  $21 \pm 2$  °C, em seguida, os corpos-de-prova permanecem 6 dias na estufa à temperatura de 54° C.

Após este prazo, os corpos-de-prova são resfriados à temperatura ambiente, capeados com enxofre e, logo a seguir, ensaiados a compressão.

Como será visto no capítulo seguinte, a cinza do bagaço de cana possui baixa reatividade química, em ambos os ensaios de atividade pozolânica com cal e com cimento. Para confirmar o resultado destes ensaios, optou-se por realizar novamente a caracterização química da cinza proveniente da segunda coleta, compreendendo a etapa 7 do fluxograma da Figura 10.

Entretanto, a composição química da cinza proveniente da primeira coleta, difere significativamente daquela oriunda da segunda coleta, como é possível verificar nos resultados do próximo capítulo. Deste modo, escolheu-se fazer uma terceira coleta da cinza seguida de sua caracterização química (etapas 8 e 9, respectivamente, do fluxograma da Figura 10) devido à discrepância encontrada nas composições químicas.

Tanto na segunda como na terceira coleta, parâmetros como teor de  $\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3$  e perda ao fogo resultaram em valores fora dos requisitos exigidos para material pozolânico pela NBR12653 (ABNT, 1992). Por esta razão, excluiu-se a realização da atividade pozolânica com cal e com cimento nas novas amostras.

Por apresentar resultados de composição química semelhantes entre a segunda e a terceira coleta, embora diferente da primeira coleta, escolheu-se usar a amostra referente à terceira coleta para dar continuidade ao programa de ensaios. A etapa 10 do fluxograma da Figura 10 é atribuída à moagem da cinza durante 20 minutos, já que o estudo dos tempos de moagem foi realizado anteriormente na etapa 4.

#### **4.3.6 Difração de raios-X**

A análise por difração de raios-X foi efetuada na etapa 11 do fluxograma da Figura 10 e determina a composição mineralógica do material, revelando se a sua estrutura é cristalina ou amorfa.

A base teórica da análise por difração está associada ao fato de que, na grande parte dos sólidos (cristalinos), os átomos se ordenam em planos cristalinos separados entre si por distâncias da mesma ordem de grandeza dos comprimentos de onda dos raios X (CORDEIRO, 2006).

Desta forma, quando um feixe de raios-X é dirigido através de um material cristalino, esses raios são difratados pelos planos dos átomos ou íons dentro do cristal (VAN VLACK, 1970).

Os dados gerados pelo ensaio são compilados em um difratograma, onde a intensidade dos picos de difração está relacionada com os respectivos ângulos de difração ( $2\theta$ ), que variam no decorrer da análise.

#### **4.3.7 Microscopia eletrônica de varredura**

Em seguida, na etapa 12 do fluxograma da Figura 10, foi executada a microscopia eletrônica de varredura (MEV) pelo Grupo de Materiais do Departamento de Física da UFMS, para verificar a morfologia e as mudanças no tamanho das partículas provocadas pela moagem.

Optou-se por efetuar a análise microscópica na amostra sem moagem e nas amostras moídas por 20 e 50 minutos devido a restrições e dificuldades de realização deste.

As imagens foram obtidas a partir de elétrons secundários através do equipamento modelo JEOL JSM 6380-LV, operando a 15 kV, a uma distância de trabalho de 10 mm. As amostras foram recobertas com ouro para promover um bom contato elétrico e descarregamento dos elétrons provenientes dos feixes.

#### **4.3.8 Confeção de argamassas de cimento, areia e CBC**

Na etapa 13 do fluxograma da Figura 10, argamassas, na proporção 1:3 (cimento : areia), em massa, foram confeccionadas utilizando-se um misturador mecânico. As amostras foram adensadas manualmente, com o uso de um soquete metálico para a aplicação dos golpes. Após a moldagem das argamassas, os corpos-de-prova foram mantidos em câmara úmida até a data do ensaio.

Conforme será visto no próximo capítulo, os resultados da análise química, difração de raio-x e da atividade pozolânica indicaram um material pouco eficaz como pozolana, na substituição do cimento. Deste modo, optou-se pela incorporação da CBC, substituindo-se parte da massa do agregado miúdo. Foi realizada uma investigação para definir a relação a/c e a consistência que seriam adequadas a todos os traços com substituição de agregado miúdo por CBC, sendo necessário o uso de aditivo superplastificante. Adotou-se a relação água/cimento 0,48 e partindo da proporção 1:3, fez-se a substituição do agregado miúdo por CBC nas porcentagens 0, 3, 5, 8 e 10%, com cinco corpos-de-prova para cada traço.

Estas argamassas foram usadas em ensaios (etapa 14 do fluxograma da Figura 10) como resistência à compressão e à tração, módulo de elasticidade, retração por secagem, reatividade acelerada, absorção por capilaridade com o intuito de verificar o seu desempenho.

#### 4.3.9 Resistência à compressão

Foram moldados cinco corpos-de-prova de dimensões (5x10) para cada idade, com ruptura aos 7, 28 e 56 dias, tomando-se como resistência final a média aritmética entre eles. Os corpos-de-prova foram moldados e curados seguindo as prescrições da NBR 7215 (ABNT, 1996) e antes de serem submetidos ao ensaio, os corpos-de-prova foram capeados com enxofre.

#### 4.3.10 Resistência à tração por compressão diametral

Este ensaio seguiu as recomendações da NBR 7222 (ABNT, 1994). O corpo-de-prova é colocado com o eixo horizontal entre os pratos da prensa e posicionado com o uso de ripas de madeira. A carga é aplicada ao longo das duas geratrizes diametralmente opostas do corpo-de-prova, como visto na Figura 24 e na Figura 25. Foram moldados cinco corpos-de-prova de dimensões (5x10) cm para cada idade, com ruptura aos 7, 28 e 56 dias, tomando-se como resistência final a média aritmética.



**Figura 24** - Posicionamento do CP para ensaio à tração por compressão diametral.



**Figura 25** - Ruptura do CP à tração por compressão diametral.

#### 4.3.11 Módulo de elasticidade

O módulo de elasticidade é utilizado para caracterizar a deformabilidade do concreto, conforme NBR 8522 (ABNT, 2003), seguindo suas prescrições e foi adaptado para argamassas. Foram moldados quatro corpos-de-prova de dimensões (5x10) de acordo a NBR 7215 (ABNT, 1996), sendo empregado um CP para ruptura e estimativa da carga de aplicação e os outros três para a obtenção do módulo de elasticidade aos 28 dias. Em cada corpo-de-prova, foram instalados dois relógios comparadores para a realização de três leituras longitudinais, como podem ser vistos na Figura 26. O limite de carregamento a ser aplicado neste ensaio correspondeu a 30% da carga de ruptura por compressão diametral.



**Figura 26** - Corpo-de-prova instalado na prensa hidráulica com os relógios comparadores.

#### 4.3.12 Retração por secagem

A determinação da variação da retração por secagem de barras de argamassa devido à utilização de materiais pozolânicos foi realizada em conformidade com a NBR 12650 (ABNT, 1992). As quantidades de cada material para o traço controle e para o traço com pozolana, neste caso, usando a CBC, constam na Tabela 12.

**Tabela 12** - Quantidade de material para a moldagem das barras de argamassa para a determinação da retração por secagem

<b>Material</b>	<b>Quantidades (g)</b>	
	<b>Traço controle</b>	<b>Traço com pozolana</b>
Cimento Portland	374,4	374,4
Areia Normal	1029,6	936,0
Pozolana	-	93,6
Água	A definir	A definir

A quantidade de água é aquela suficiente para produzir consistência  $225 \pm 5$ mm. Estas quantidades correspondem a moldagem de três corpos-de-prova prismáticos (25x25x285) mm para o traço controle e para o traço com pozolana. Logo após a desmoldagem, os corpos-de-prova permaneceram 7 dias submersos em água, e então se seguiu a leitura inicial. Posteriormente, foram mantidos em câmara seca por 28 dias e obtida a leitura final. A variação da retração por secagem das barras de argamassa deve ser calculada pelas Equações 4 e 5.

$$VR_S = R_{SE} - R_{SC} \quad \text{Equação 4}$$

Onde:

$VR_S$  - variação da retração por secagem das barras (%)

$R_{SE}$  - retração média das barras do traço com pozolana (%)

$R_{SC}$  - retração média das barras do traço controle (%)

$$R_{SE} = \frac{(L_{IE} - L_{FE})}{L_{IE}} \times 100 \quad \text{Equação 5}$$

Onde:

$R_{SE}$  - retração média por secagem das barras do traço com pozolana (%)

$L_{IE}$  - comprimento médio inicial das barras ao final da cura úmida (mm)

$L_{FE}$  - comprimento médio final das barras ao final da cura seca (mm)

### 4.3.13 Reatividade acelerada

O ensaio de reatividade potencial dos agregados foi realizado seguindo a NBR 15577-5 (ABNT, 2008) e avalia a reação álcali-agregado através do acompanhamento da expansão em barras de argamassa. Objetivou-se executar este ensaio a fim de verificar os possíveis efeitos da CBC na redução da expansibilidade das barras.

Três barras de argamassa nas dimensões de (25x25x285) mm foram confeccionadas, na proporção 1 : 2,25 (cimento:agregado) e relação água/cimento de 0,47 para cada tipo de mistura. Foram adotados teores de substituição do cimento por CBC de 0, 5 e 10%, em volume.

Após a desmoldagem, os corpos-de-prova permaneceram imersos em água por 24 horas para então ser determinado o comprimento de referência. Em seguida, as barras foram imersas em solução de hidróxido de sódio 1 N à temperatura de 80°C por 30 dias.

Periodicamente, foram feitas leituras da variação dos comprimentos (Figura 27) até completar os 30 dias. Os resultados são expressos em porcentagem de expansão, correspondendo às médias dos comprimentos das três barras de argamassa.

Conforme a NBR 15577-5 (ABNT, 2008) os resultados são interpretados da seguinte forma:

- expansões inferiores a 0,190% aos 30 dias indicam um comportamento potencialmente inócuo;
- expansões superiores a 0,190% aos 30 dias são um indicativo de expansão potencialmente reativa;

Observa-se que, para a ASTM C-1260 (2005), o limite para potencialmente reativo é 0,100% aos 16 dias.



**Figura 27** - Medição da expansão da barra de argamassa devido à reatividade do agregado.

#### **4.3.14 Absorção por capilaridade e sorptividade**

O ensaio para determinar a absorção por capilaridade foi efetuado através da NBR 9779 (ABNT, 1995) em 5 corpos-de-prova cilíndricos de dimensões (5X10)cm, por traço, cuja moldagem seguiu a NBR 7215 (ABNT, 1996). Os corpos-de-prova permaneceram em cura até as idades de 7 e 28 dias quando foram inseridos em estufa para a secagem até a constância da massa. Posteriormente, foram retirados da estufa e mantidos ao ar livre para resfriamento, com o intuito de evitar taxas iniciais elevadas de absorção de água.

Além disso, fez-se o uso de aditivo impermeabilizante aplicado em duas camadas sobre a superfície lateral dos corpos-de-prova, deixando a base livre para a penetração de água e medição da altura da lâmina d'água e, antes de iniciar a imersão, os corpos-de-prova foram pesados, determinando-se a massa inicial.

Em seguida, os corpos-de-prova foram colocados sobre um suporte, num recipiente contendo água, permanecendo constante a  $5\pm 1$  mm acima da face inferior. A massa foi determinada com 3, 6, 9, 24, 48 e 72 horas contadas a partir da colocação destes em contato com a água.

Após a última etapa, os corpos-de-prova foram rompidos por compressão diametral de modo a permitir a anotação da distribuição de água no seu interior. A absorção por capilaridade é determinada pela Equação 6.

$$C = \frac{(A - B)}{S}$$

**Equação 6**

Onde:

C – absorção por capilaridade expressa em g/cm<sup>2</sup>

A – massa do corpo-de-prova que permanece com umas das faces em contato com água durante o período de tempo especificado (g)

B – massa inicial do corpo-de-prova após seu resfriamento e impermeabilização (g)

S – Área da seção transversal da superfície em contato com a água (cm<sup>2</sup>)

### ***Sorptividade***

Através do ensaio de absorção de água por capilaridade também é possível determinar o coeficiente de sorptividade descrito na Equação 7.

$$X = S\sqrt{t}$$

**Equação 7**

Onde,

S – coeficiente de sorptividade (m/s<sup>1/2</sup>)

X - volume de água absorvido por área de seção transversal do corpo-de-prova (m<sup>3</sup>/m<sup>2</sup>)

t - tempo (s)

## 5 RESULTADOS

---

“Results? Why, man, I have gotten lots of results! If I find 10.000 ways something won’t work, I haven’t failed. I am not discouraged, because every wrong attempt discarded is often a step forward...” (Resultados? Eu tenho muitos resultados! Se eu encontro mil maneiras de alguma coisa não funcionar, não é que eu tenha falhado. Eu não desanimo, porque cada tentativa descartada é um passo adiante)  
Thomas Edison

### 5.1 Caracterização química da cinza

A caracterização química das cinzas coletadas das diferentes usinas, na etapa 1 do fluxograma da Figura 10, encontra-se na Tabela 13, lembrando que CBC1, CBC2 e CBC3 são da Usina Interlagos, CBC4 é procedente da Pioneiros Bioenergia S/A e CBC5 e CBC6 são originárias da Destilaria Generalco S/A.

**Tabela 13** - Análise química da cinza do bagaço de cana da utilizada neste trabalho.

Amostra	CBC1	CBC2	CBC3	CBC4	CBC5	CBC6	Especificações NBR 12653
Data	30/7/2007						
Umidade da amostra %	1,29	0,50	1,37	2,24	0,15	0,06	3,00
Perda ao fogo	13,30	4,68	12,14	38,92	0,96	0,51	6,0
SiO <sub>2</sub>	59,75	71,96	62,34	33,94	94,11	85,26	
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	6,00	5,43	6,00	2,86	1,14	2,57	
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	10,28	7,15	7,78	5,62	0,74	1,98	
Análise Química (%)	CaO	1,21	1,00	0,98	5,62	0,35	0,71
	MgO	0,56	0,63	0,53	0,61	0,13	0,50
	SO <sub>3</sub>	0,08	0,03	0,08	0,23	0,11	0,17
	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> + Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	16,28	12,58	13,78	8,48	1,88	4,55
	SiO <sub>2</sub> +Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> +Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	76,03	84,54	75,12	42,42	95,99	89,81
	Eq.alc.(álcalis dispon.)	1,50	1,43	1,59	0,62	0,43	0,98
							1,5

Conforme a caracterização química das cinzas, tanto a CBC5 quanto a CBC6 está em conformidade com as exigências químicas para material pozolânico, segundo NBR12653 (ABNT, 1992) contendo alto teor de SiO<sub>2</sub>+Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>+Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, reduzida perda ao fogo e baixo teor de álcalis disponíveis. No entanto, a CBC5 foi escolhida para ser estudo deste trabalho por haver grande quantidade de material disponível na usina e porque a CBC6 estava bastante contaminada com plástico derretido, restos metálicos, entre outros.

Entretanto, duas novas amostras de CBC foram coletadas da mesma usina (Destilaria Generalco S/A) em épocas diferentes, como mostram as etapas 3 e 8 do fluxograma da Figura 10. As duas novas amostras foram denominadas de CBC5A e CBC5B para facilitar o entendimento. Deste modo, duas novas caracterizações químicas referentes à CBC5A e à CBC5B foram efetuadas, cujos resultados encontram-se na Tabela 14.

**Tabela 14** - Análise química das novas amostras de CBC da Destilaria Generalco S/A.

Amostra		CBC5A	CBC5B	Especificações
Data		18/1/2008	15/05/2008	NBR 12653
	Umidade da amostra %	3,56	2,28	3,00
	Perda ao fogo	35,34	32,59	6,0
Análise	SiO <sub>2</sub>	36,58	44,30	
	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	4,00	3,43	
	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	8,30	8,74	
Química	CaO	2,71	9,60	
	MgO	0,51	0,76	
	SO <sub>3</sub>	0,45	0,35	5,0
(%)	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> + Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	12,30	12,18	
	SiO <sub>2</sub> +Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> +Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	48,88	56,48	70,00
	Eq.alc.(alcalis dispon.)	0,18	0,07	1,5

Observa-se que as cinzas originárias da mesma usina, mas em épocas de coleta distintas se diferenciam quimicamente. Por exemplo, os teores de SiO<sub>2</sub>+Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>+Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> da CBC5, CBC5A e CBC5B valem 95,99%, 48,88% e 56,48%, respectivamente. Esta modificação também ocorreu na perda ao fogo, que variou de 0,96% da CBC5 para 35,34% e 44,30% da CBC5A e CBC5B, respectivamente. O teor de óxido de cálcio nas amostras CBC5, CBC5A e CBC5B também resultou em valores discrepantes: 0,35%, 2,71% e 9,6%, respectivamente.

No entanto, as amostras CBC5A e CBC5B possuem um comportamento parecido quanto ao teor de SiO<sub>2</sub>+Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>+Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> e de perda ao fogo. Nota-se que estes parâmetros encontram-se fora dos requisitos exigidos para material pozolânico pela NBR12653 (ABNT, 1992), diferentemente da CBC5 que satisfaz a estes requisitos. Estes resultados indicam que a usina em questão não produz cinza de maneira uniforme.

Embora a CBC5B não se enquadre nos requisitos da NBR12653 (ABNT, 1992), escolheu-se usá-la no programa de ensaios para verificar a possibilidade de sua incorporação em argamassas e propor uma destinação ao resíduo.

## 5.2 Moagem

A Tabela 15 mostra os valores de superfície específica por Blaine, massa específica e finura na peneira #325, referentes ao estudo inicial da moagem da CBC5A.

**Tabela 15** - Resultados dos ensaios realizados no estudo da moagem da cinza do bagaço de cana.

<b>Tempo de moagem (min)</b>	<b>Superfície específica Blaine (cm<sup>2</sup>/g)</b>	<b>Índice de finura (% retida na peneira #325)</b>	<b>Massa específica (g/cm<sup>3</sup>)</b>
<b>20</b>	11270	6,84	2,22
<b>30</b>	12948	3,34	2,22
<b>40</b>	13571	1,69	2,17
<b>50</b>	14164	0,96	2,17

Pela Tabela 15, é possível perceber que a superfície específica por Blaine aumentou de 11270 cm<sup>2</sup>/g em 20 minutos de moagem para 14164cm<sup>2</sup>/g em 50 minutos de moagem; o índice de finura reduziu de 6,84% para 0,96%, em 20 e 50 minutos de moagem, respectivamente.

Deste modo o processo de moagem mostrou-se adequado por proporcionar a redução do tamanho dos grãos de cinza e por propiciar melhor uniformidade do material.

## 5.3 Distribuição granulométrica

Para complementar a escolha do tempo ideal de moagem, realizou-se a distribuição granulométrica a laser da CBC5A, como mostra a Figura 28. A Tabela 16 mostra os tamanhos das partículas abaixo dos quais encontram-se 10% e 90% da massa do material, D<sub>10</sub> e D<sub>90</sub>, respectivamente; além da dimensão média.

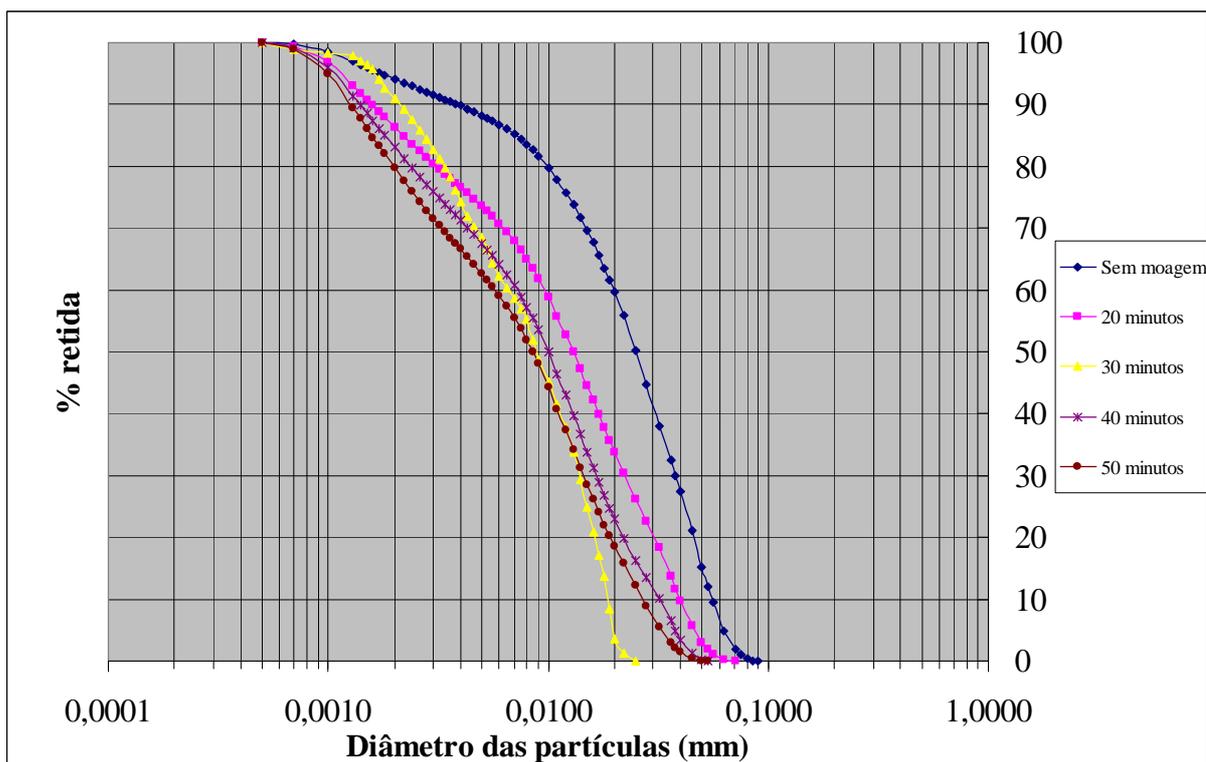


Figura 28 – Curva granulométrica das cinza.

Tabela 16 - Diâmetro obtido por granulometria a laser ( $\mu\text{m}$ ).

Tempo de moagem (min)	D <sub>10</sub> ( $\mu\text{m}$ )	Dimensão média ( $\mu\text{m}$ )	D <sub>90</sub> ( $\mu\text{m}$ )
Sem moagem	3,87	25,13	55,33
20 minutos	1,58	12,97	39,72
30 minutos	2,51	10,58	21,42
40 minutos	1,39	9,99	32,23
50 minutos	1,26	8,49	27,00

A dimensão média das partículas decaiu de 25,13  $\mu\text{m}$  sem moagem para 12,97  $\mu\text{m}$  em 20 minutos de moagem; a partir deste tempo, o decréscimo é consideravelmente menor. As curvas granulométricas da Figura 28 e as dimensões das partículas confirmam a eficiência da moagem; embora a curva de 30 minutos apresente maior inclinação que as demais.

Conforme os resultados superfície específica, índice de finura e distribuição granulométrica adotou-se o tempo de 20 minutos de moagem da cinza como sendo o tempo ideal para a aplicação em argamassas por melhorar a uniformidade dos grãos, reduzir a dimensão média das partículas e por ser o menor tempo estudado, já que o processo consome energia, que se transforma em custo adicional. A Figura 29 mostra o aspecto da CBC moída por 20 minutos.



**Figura 29** - Aspecto da cinza do bagaço de cana usada na composição das argamassas

#### ***5.4 Atividade pozolânica***

A Tabela 17 se refere aos ensaios de atividade pozolânica com cimento e com cal da CBC5A. O IAP com cal resultou em zero para todos os traços, indicando que os corpos-de-prova não adquiriram resistência com a mistura de areia normal, hidróxido de cálcio e do suposto material pozolânico – a cinza do bagaço de cana. O IAP com cimento de todos os traços permaneceu abaixo do índice mínimo estipulado pela NBR 12653 (ABNT, 1992) de 75% para material pozolânico, embora tenha ocorrido um incremento de 1,7% entre a moagem de 20 minutos e a de 40 minutos. Além disso, ocorreu um decréscimo de 3,3% entre as moagens de 40 e 50 minutos, o que sugere ser 40 minutos o tempo máximo para a moagem da CBC.

Deste modo, verifica-se que a adição da cinza CBC5A é considerada não pozolânica em ambos os ensaios de atividade pozolânica. Como o ensaio químico da CBC5B revelou que o teor de  $\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3$  é insuficiente para ser classificada como pozolana, não houve necessidade de repetir este ensaio para a referida cinza.

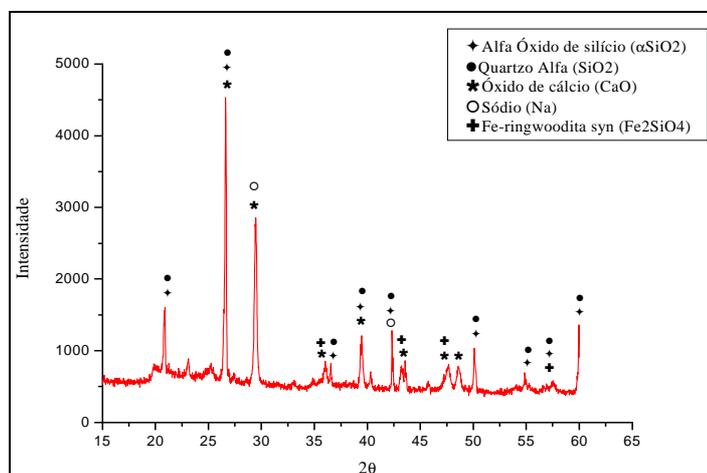
**Tabela 17** - Índice de atividade pozolânica com cal e com cimento.

Traço	Atividade com cal			Atividade com cimento				
	Água (g)	Flow (mm)	IAP (MPa)	Água (g)	Flow (mm)	Resistência (MPa)	IAP (%)	Água requerida
Controle	-	-	-	170,00	230,00	47,90	-	-
20	290,00	222,00	0,00	195,00	228,00	24,20	50,52	1,14706
30	290,00	229,00	0,00	194,00	225,00	24,30	50,73	1,14118
40	280,00	228,00	0,00	185,00	220,00	24,60	51,36	1,08824
50	277,00	227,00	0,00	190,00	226,00	23,80	49,69	1,11765

### 5.5 Difração de raios-X

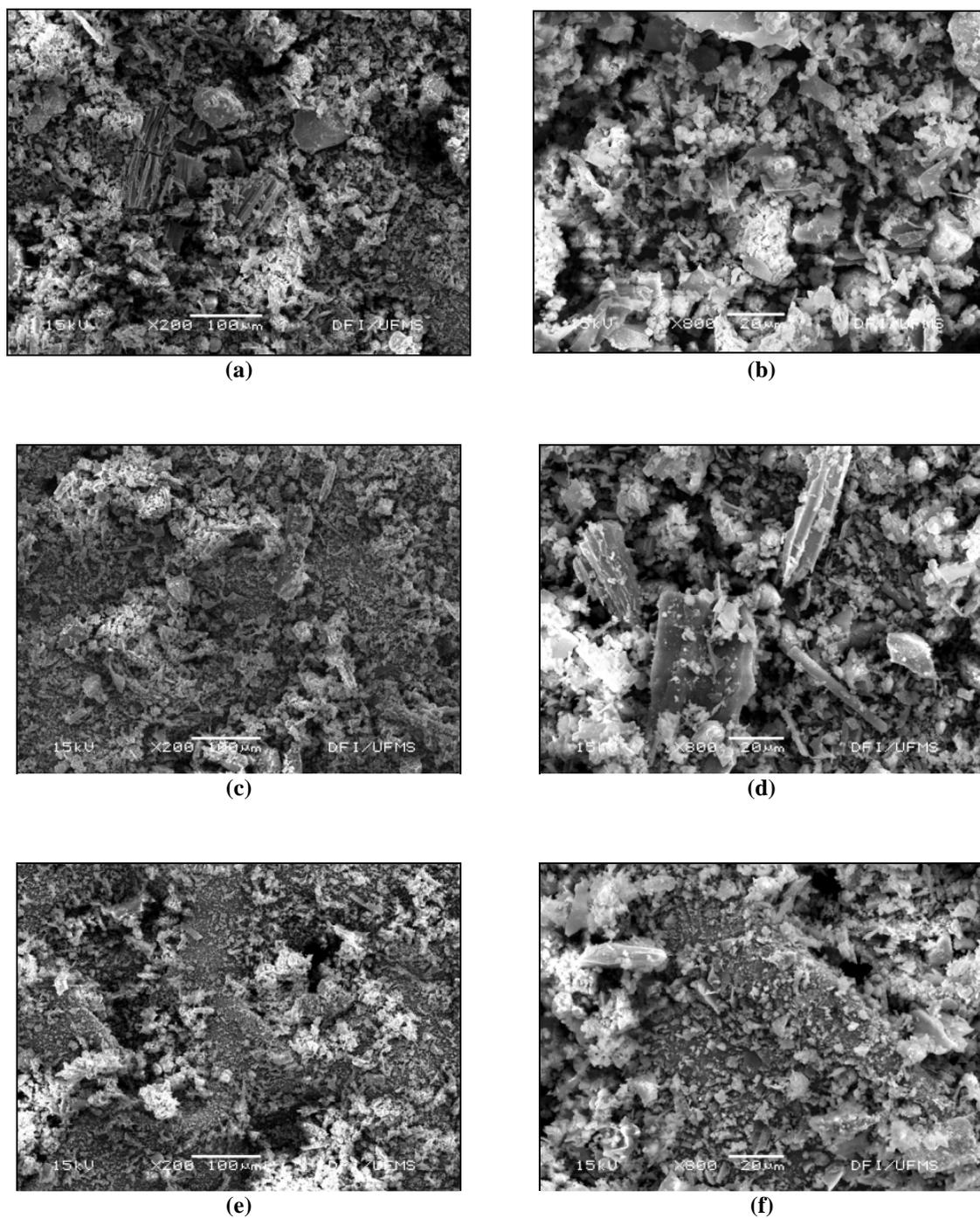
A Figura 30, correspondente ao difratograma da CBC5B empregada neste trabalho, exhibe picos intensos de alfa óxido de silício e quartzo alfa, o que evidencia a existência de suas fases cristalinas. No entanto, é possível notar um pequeno desvio na linha de base no ângulo ( $2\theta$ )  $20^\circ$ , que sugere indícios de uma pequena quantidade de fase amorfa. Este ensaio confirma a baixa reatividade do material, considerando-o como não pozolânico devido à predominância de fases cristalinas encontradas.

No entanto, sugere-se a realização complementar de análise termogravimétrica para verificar a atividade pozolânica das cinzas já que a termogravimetria realizada na CBC de Payá et al (2002) mostrou elevada atividade pozolânica embora os autores tenham encontrado sílica cristalina e elevada quantidade de carbono na mesma.

**Figura 30** - Difratograma da CBC usada neste trabalho.

## 5.6 Microscopia eletrônica de varredura

A Figura 31 retrata a morfologia das partículas de CBC5B, com aumento de 200 e 800 vezes.

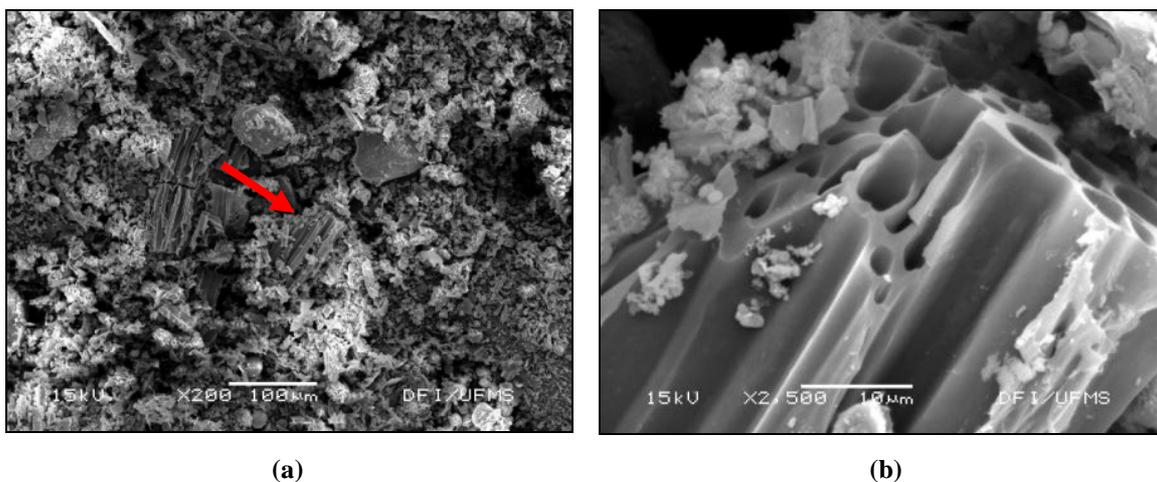


**Figura 31** - Morfologia das partículas de cinza do bagaço de cana sem moagem (a) e (b), moídas por 20 minutos (c) e (d), moídas por 50 minutos (e) e (f) [Imagens obtidas por MEV com aumento de 200 vezes para as figuras (a), (c) e (e) e com aumento de 800 vezes para as figuras (b), (d) e (f)].

Devido à dificuldade de obtenção da análise por microscopia eletrônica de varredura (MEV), foram realizadas imagens apenas de amostras de CBC sem moagem, de CBC moída por 20 minutos e por 50 minutos.

Observa-se a predominância de partículas maiores na amostra sem moagem (Figura 31a) e a presença de partículas menores pelo processo de moagem por 20 minutos (Figura 31c) e por 50 minutos (Figura 31e). Com isto, verifica-se a eficiência da moagem pela redução do tamanho dos grãos e pela homogeneização dos mesmos.

Em diversas imagens, verifica-se a presença de formas tubulares que podem ser atribuídas aos capilares da planta. Estes representam a matéria orgânica que o parâmetro químico de perda ao fogo indicou existir na amostra de CBC5B. Na Figura 32a - imagem com aumento de 200 vezes da amostra sem moagem, por exemplo, vê-se esta forma (tubular) indicada na seta; ao ampliar 2500 vezes, esta pode ser visualizada com mais clareza (Figura 32b).



**Figura 32** - Morfologia das partículas de CBC, com detalhe das formas tubulares.

### ***5.7 Confeção de argamassas***

A composição final dos traços de argamassa é apresentada na Tabela 18. Notou-se um gradativo escurecimento dos corpos-de-prova em virtude do acréscimo de CBC.

Foi necessária a introdução de uma quantidade mínima de aditivo superplastificante nas incorporações de 5, 8 e 10% e adequada para que se mantivesse a relação água/cimento constante, promovendo boa dispersão dos grãos e aumentando a fluidez da pasta.

Observa-se ainda que para o teor de 10%, a consistência é reduzida devido ao emprego da quantidade limite de aditivo especificada pelo fabricante. Por este motivo, não se conseguiu introduzir maiores teores de substituição de areia por CBC. A argamassa referente ao traço 10% era bastante seca e bem difícil de trabalhar.

Além disso, notou-se um gradativo escurecimento na coloração dos corpos-de-prova em virtude de acréscimo do teor de CBC adicionado.

**Tabela 18** - Composição final dos traços de argamassa.

<b>Traço</b>	<b>Cimento (g)</b>	<b>Areia (g)</b>	<b>CBC (g)</b>	<b>Água (g)</b>	<b>Aditivo (%)</b>	<b>Relação a/c</b>	<b>Flow (mm)</b>
Controle	1000,00	3000,00	–	480,00	-	0,48	186
3%	1000,00	2910,00	90,00	480,00	-	0,48	185
5%	1000,00	2850,00	150,00	480,00	0,20	0,48	193
8%	1000,00	2760,00	240,00	480,00	0,60	0,48	193
10%	1000,00	2700,00	300,00	480,00	0,90	0,48	181

### ***5.8 Resistência à compressão***

Este ensaio foi realizado pela média aritmética dos valores de resistência à compressão dos cinco corpos-de-prova, excluindo-se os valores que ultrapassam o desvio relativo máximo de 6% , definido pela NBR7215 (ABNT, 1996). Os resultados individuais encontram-se no Apêndice A.

Através dos resultados da Figura 33, observa-se que, aos 7 dias, as resistências dos traço de 3, 5 e 8% são muito semelhantes, e são menores do que a resistência do traço controle, mas elas evoluem com a idade de 28 e 56 dias, indicando que a evolução da resistência à compressão é mais lenta.

No entanto, aos 56 dias, todos os traços com CBC obtiveram resistência superior ao traço controle, que pode ser atribuída ao efeito físico de preenchimento dos vazios pelos grãos finos da cinza. Houve um acréscimo de 23,3% da resistência à compressão, aos 56 dias, do traço controle para o traço 10%.

A presença do aditivo superplastificante no incremento da resistência nos traços 5, 8 e 10%. é insignificante uma vez que ocorreu aumento da resistência até no traço 3% (que não possui aditivo) em relação ao controle.

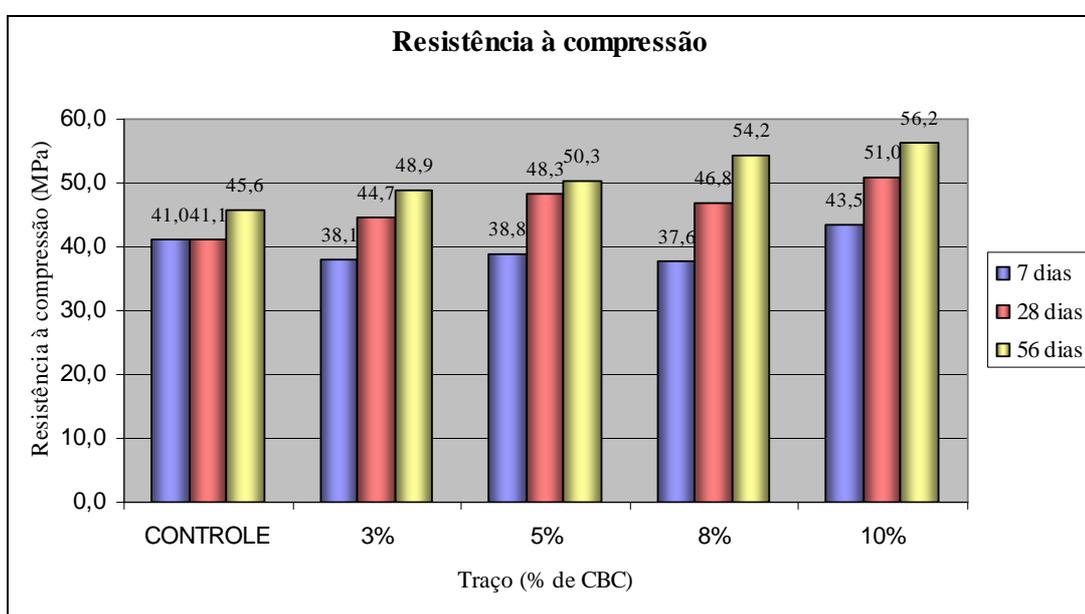


Figura 33 - Resistência à compressão.

### 5.9 Resistência à tração compressão diametral

Este ensaio foi realizado pela média aritmética dos valores de resistência à compressão dos cinco corpos-de-prova, excluindo-se os valores que ultrapassam o desvio relativo máximo de 6% definido pela NBR7215 (ABNT, 1996). Os resultados individuais encontram-se no Apêndice B.

De acordo com a Figura 34, ocorreu um acréscimo de resistência à tração por compressão diametral no traço 3% em relação ao controle para todas as idades. No entanto, a partir do

traço 5%, as resistências permaneceram praticamente iguais e inferiores às resistências do traço 3%. Com isto, considera-se, para este ensaio, como teor ótimo de substituição o traço com 3% de CBC.

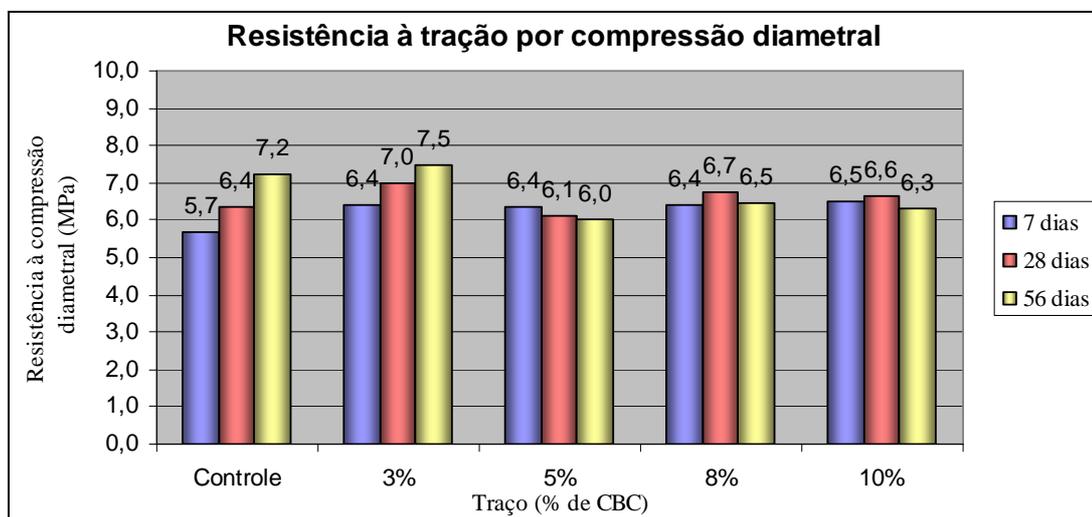


Figura 34 - Resistência à tração por compressão diametral.

### 5.10 Módulo de elasticidade

Analisando a Figura 35, percebe-se, de modo geral, que com a incorporação mineral, ocorreu um decréscimo dos valores do módulo de elasticidade e um incremento na deformabilidade dos corpos-de-prova, pois, de acordo com a Lei de Hook, materiais com baixo módulo deformam muito elasticamente quando sujeitos às solicitações mecânicas.

Entretanto, o módulo de elasticidade do traço 8% resultou em um valor inferior ao dos traços 5% e 10%, o que sugere algum erro de execução. Vale salientar que para a realização deste ensaio, foram usados relógios comparadores para a medição das deformações, dificultando as suas leituras e reduzindo a precisão do ensaio.

Recomenda-se até 5% de incorporação de CBC, pois o decréscimo do módulo de elasticidade em relação ao traço controle é de 10%, a partir deste teor a redução é significativamente maior.

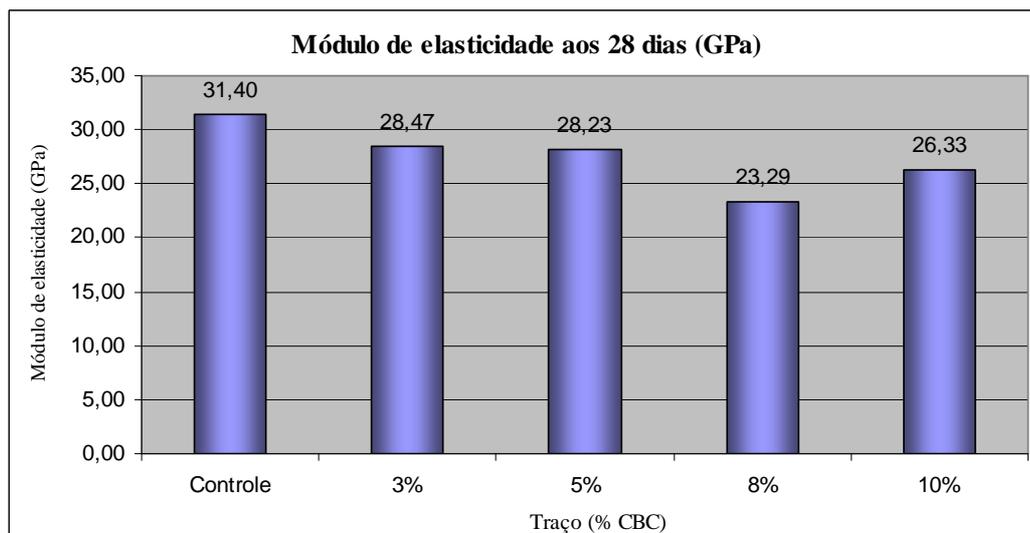


Figura 35 - Módulo de elasticidade aos 28 dias.

### 5.11 Retração por secagem

A Tabela 20 apresenta os valores encontrados na determinação da retração por secagem de argamassas devida à utilização de material pozolânico. A retração do traço controle (contendo apenas, cimento, areia normal e água) adquiriu valor de 0,052%; em contrapartida, o traço com pozolana (contendo cimento, areia normal, água e CBC) resultou em 0,078% de retração.

Em suma, ocorreu aumento de 0,026% na retração por secagem devido ao emprego da CBC embora este aumento tenha sido inferior ao limite máximo de 0,05% definido pela NBR 12653 (ABNT, 1992) que classifica os materiais pozolânicos.

Tabela 19 - Retração por secagem.

Traço	CP	Leitura inicial (mm)	Leitura final (mm)	Leitura média inicial (mm)	Leitura média final (mm)	Retração (%)	Varição da retração (%)
Controle	1	294,242	294,091				
	2	293,459	293,303	293,841	293,687	0,052	
	3	293,821	293,667				0,026
Ensaio	1	294,587	294,351				
	2	293,679	293,453	294,284	294,055	0,078	
	3	294,587	294,362				

### 5.12 Reatividade acelerada

Os resultados do ensaio de reatividade potencial acelerada estão disponíveis na Figura 36. A linha tracejada indica o limite de expansão abaixo da qual o material pode ser considerado como potencialmente inócuo aos 30 dias, conforme estipula NBR15577-5 (ABNT, 2008). Nota-se que os três traços (controle, 5 e 10%) são considerados potencialmente reativos.

Entretanto, aos trinta dias, os dois traços contendo CBC (5 e 10%) obtiveram expansões semelhantes e abaixo da expansão do traço controle, com um decréscimo da ordem de 15%. Esta redução da expansão indica que a incorporação de CBC em argamassas possui alguma atividade pozolânica.

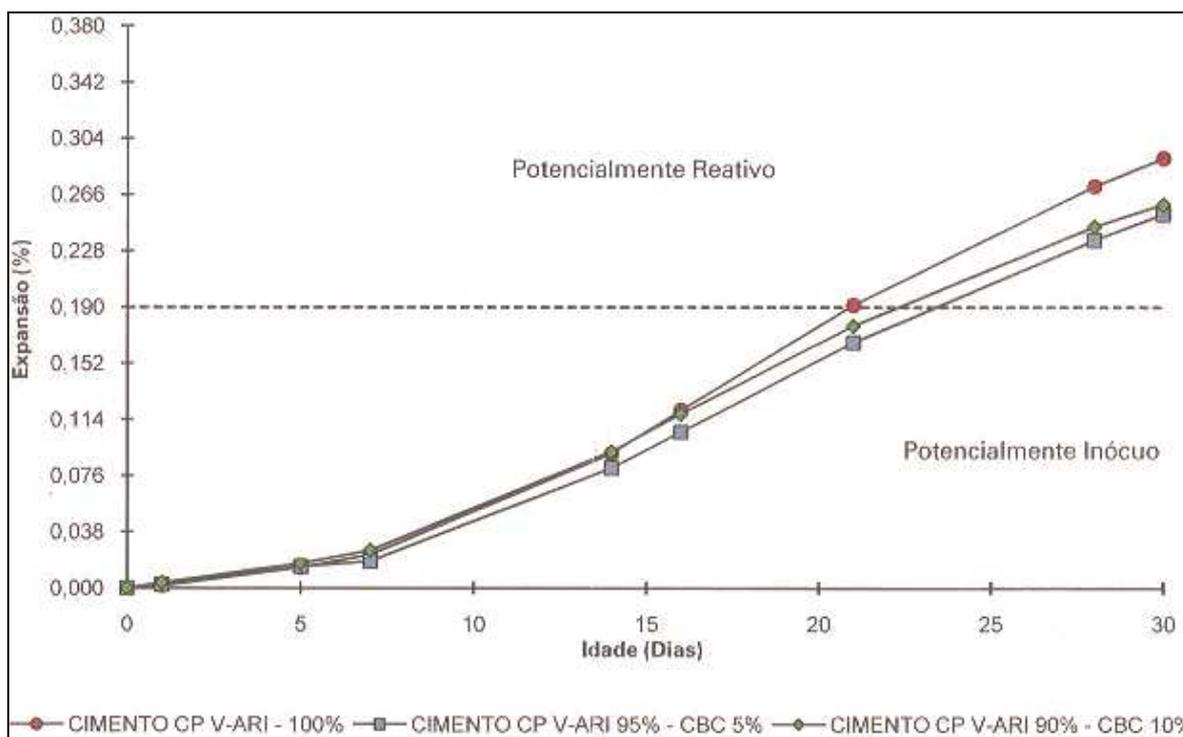


Figura 36 - Reatividade potencial acelerada.

### 5.13 Absorção por capilaridade

As Figuras 37 e 38 revelam a absorção por capilaridade aos 7 e 28 dias, respectivamente. Os resultados individuais encontram-se no apêndice C, bem como as imagens da distribuição de água nos corpos-de-prova. Para as duas idades, verifica-se a redução da absorção por capilaridade ao adicionar quaisquer dos teores de CBC. A adição de finos nessas argamassas está diretamente associada ao efeito físico, uma vez que promoveu o preenchimento dos vazios presentes na pasta, e, com isto, dificultou da movimentação de água através dos capilares.

Nota-se um decréscimo bastante acentuado de 27% e 38%, aos 7 e 28 dias, respectivamente, da absorção por capilaridade ao final do ensaio (72 horas) do traço controle em relação ao traço 3%. Contudo, a partir deste teor de substituição, o decréscimo se tornou menor, indicando o traço 3% possui maior eficiência na redução da absorção.

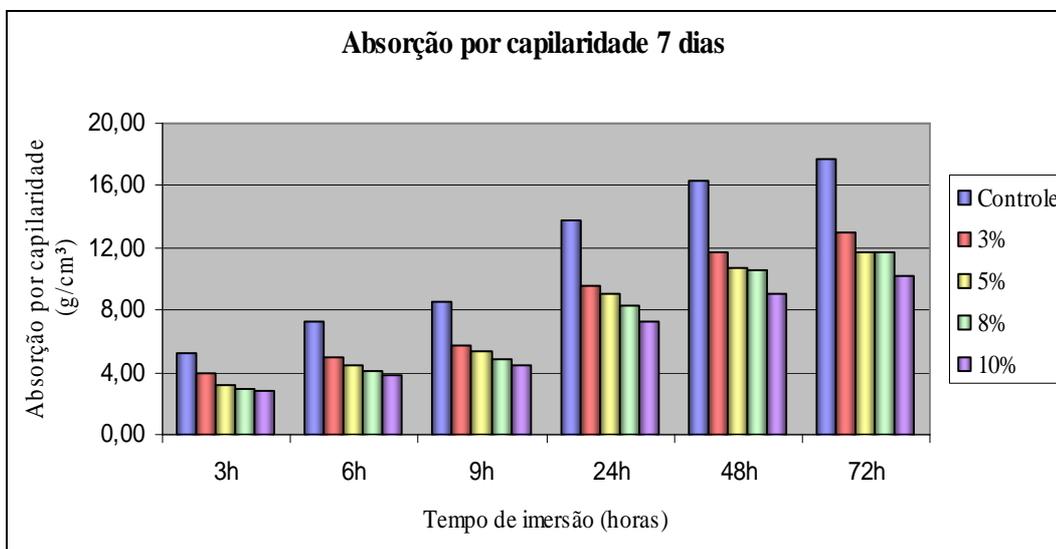
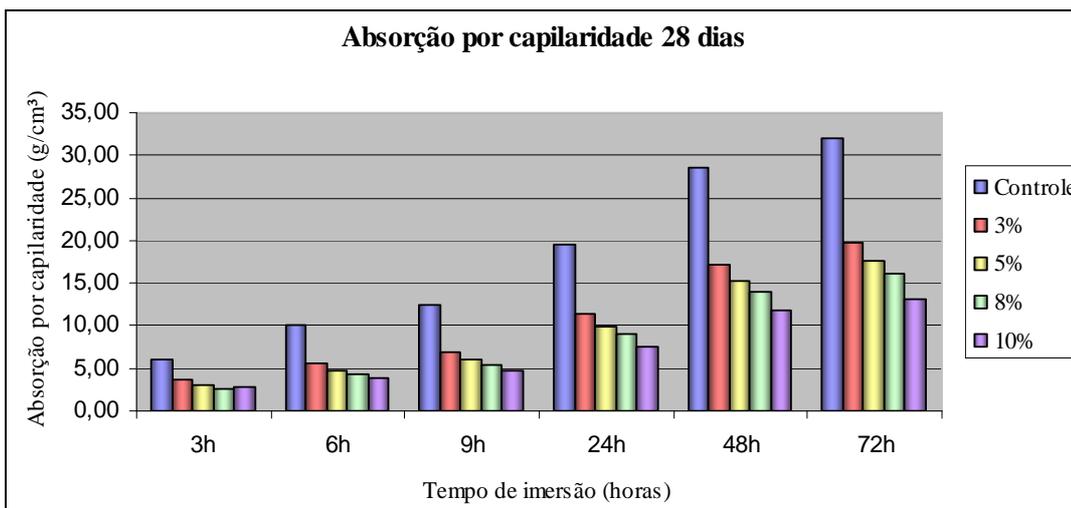


Figura 37 - Absorção por capilaridade aos 7 dias.

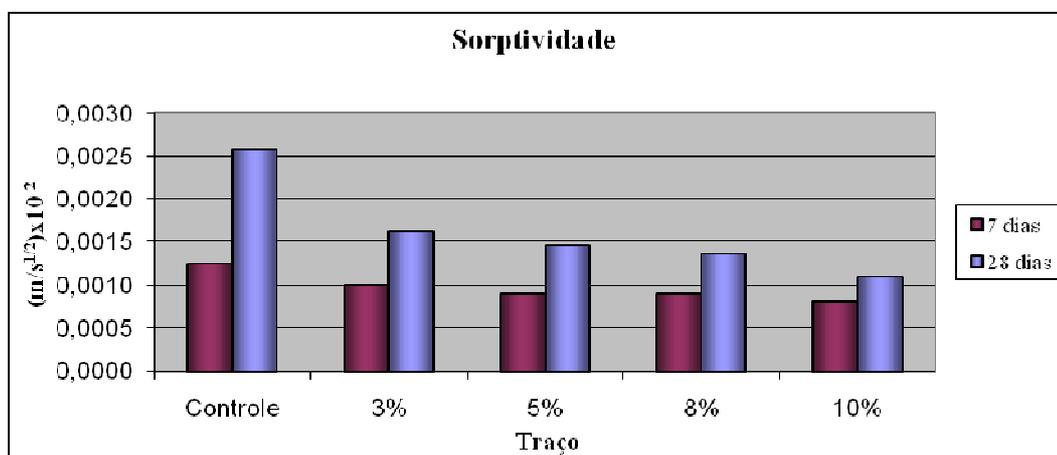


**Figura 38** - Absorção por capilaridade aos 28 dias.

**Sorptividade**

Na prática, a sorptividade é dada pela inclinação  $m$  da reta obtida no gráfico do volume de líquido absorvido por área de seção transversal em função da raiz quadrada do tempo ( $\sqrt{t}$ ). Deste modo, os resultados individuais da sorptividade encontram-se nos apêndices E e F.

Para os traços de argamassas estudados, observa-se a redução da sorptividade com o acréscimo de CBC, o que indica que a CBC diminui a porosidade da argamassa devido ao efeito fíler. Ocorreu um decréscimo da sorptividade mais acentuado no traço 3% em relação ao controle, com valores de 19,3% e de 37,2%, aos 7 e 28 dias, respectivamente. E assim como o ensaio de absorção por capilaridade, o decréscimo a partir do traço 5% se torna menor, indicando 3% ser o traço mais eficiente para a redução da sorptividade.



**Figura 39** – Coeficiente de sorptividade em função dos traços.

## 6 CONCLUSÕES

---

“Com a ciência acontece um excitante paradoxo: a decepção não significa sempre derrota.  
Pode ser um passo a frente.”  
P. D. James

## **6.1 Conclusões**

Conforme os resultados iniciais de composição química, a usina de onde foram retiradas as cinza usadas neste trabalho não produz um material homogêneo, já que ocorreram variações nos parâmetros como teor de  $\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3$ , de óxido de cálcio e perda ao fogo de diferentes amostras.

Apesar da existência destas diferenças, o trabalho foi realizado com a CBC de baixa atividade pozolânica. Entretanto, confirmou-se que é possível utilizar a cinza do bagaço de cana-de-açúcar como substituição parcial do agregado miúdo na produção de argamassas.

O processo de moagem mostrou-se importante, tendo em 20 minutos o tempo ideal de moagem por propiciar homogeneidade no tamanho dos grãos e sua redução, confirmada pela superfície específica, granulometria a laser e microscopia eletrônica de varredura.

Os ensaios de composição química e atividade pozolânica mostraram que a CBC não pode ser classificada como pozolana, segundo os critérios da NBR 12653 (ABNT, 1992), embora para o ensaio de retração por secagem, esta incorporação tenha resultado em um valor abaixo do limite especificado pela referida norma.

O difratograma da CBC revelou picos de estrutura cristalina, além de indicar um desvio da linha de base no ângulo  $(2\theta)$   $20^\circ$  que sugere a existência de uma pequena parcela de material amorfo. É necessária a realização de outros ensaios como análise termogravimétrica para verificar melhor a atividade pozolânica do material

Vale lembrar que são controversos os métodos de avaliação da pozolanidade do material. Gava (1999), por exemplo, contesta a utilização de características químicas e físicas e o grau de amorfismo da pozolana para a sua classificação e seleção.

Os resultados de resistência à compressão mostraram um aumento em todos os teores de incorporação de CBC atribuído ao efeito físico de preenchimento dos vazios pelos grãos finos da mesma.

Houve um incremento na resistência à tração por compressão diametral do traço contendo 3% de CBC em relação ao traço controle, sendo aquele considerado o teor ótimo de substituição.

Recomenda-se até 5% de incorporação de CBC, pois o decréscimo do módulo de elasticidade em relação ao traço controle corresponde a um valor de 10%; a partir deste teor a redução é significativamente maior.

A adição dos finos de CBC para todos os teores de substituição propiciou a redução da absorção por capilaridade e da sorptividade uma vez que promoveu o preenchimento dos vazios, dificultando o ingresso de agentes agressivos ao concreto.

Diante do exposto, acredita-se que a introdução de cinza do bagaço de cana-de-açúcar possa ser considerada um material alternativo para a produção de argamassas e, possivelmente de concreto, por melhorar várias de suas propriedades e principalmente, por reduzir o impacto ambiental causado pela sua destinação inadequada.

## ***6.2 Sugestões para trabalhos futuros.***

Propõe-se que sejam realizados estudos em concretos, tendo em vista que o presente trabalho limitou-se a realização de ensaios em argamassas. Seria adequada também a realização de um estudo aprofundado sobre a durabilidade de concretos confeccionados com esta cinza e verificar seu comportamento frente aos agentes agressivos ao longo do tempo.

Além disso, sugere-se um estudo sobre calcinação das cinzas para a produção de material amorfo e homogêneo quimicamente, com elevada atividade pozolânica, para que seja viável economicamente e com isto, para que a usina possa implementar.

Diante dos controversos métodos de classificação da pozolana, torna-se importante avaliar as propriedades pozolânicas da CBC, aplicando-se diferentes métodos encontrados na literatura (GAVA, 1999, PAYÁ, et al., 2002, MARTIRENA-HERNÁNDEZ, et al., 1998, 2000, 2001, VILLAR-COCCINA, et al., 2003, FRÍAS, et al., 2005).

## REFERÊNCIAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE CIMENTO PORTLAND - ABCP. *Guia básico de utilização do cimento portland*: BT-106. 7 ed. São Paulo: [s.n.] 2002. 28 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT. *NBRNM23*: cimento portland e outros materiais em pó – determinação de massa específica. Rio de Janeiro, 2001.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - ABNT. *NBRNM30*: agregado miúdo – determinação da absorção de água. Rio de Janeiro, 2001.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - ABNT. *NBRNM45*: agregados – determinação da massa unitária e do volume de vazios. Rio de Janeiro, 2006.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - ABNT. *NBRNM46*: agregados – determinação do material fino que passa através da peneira 75 micrometro, por lavagem. Rio de Janeiro, 2003.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - ABNT. *NBRNM52*: agregado miúdo – determinação da massa específica e massa específica aparente. Rio de Janeiro, 2003.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - ABNT. *NBRNM76*: cimento portland – determinação da finura pelo método de permeabilidade ao ar (Método de Blaine). Rio de Janeiro, 1998.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - ABNT. *NBRNM248*: agregados – determinação da composição granulométrica. Rio de Janeiro, 2003.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - ABNT. *NBR 5733*: cimento portland de alta resistência inicial. Rio de Janeiro, 1991.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - ABNT. *NBR 5751*: materiais pozolânicos – determinação de atividade pozolânica – índice de atividade pozolânica com cal. Rio de Janeiro, 1992.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - ABNT. *NBR 5752*: Materiais pozolânicos – determinação de atividade pozolânica com cimento Portland – índice de atividade pozolânica com cimento. Rio de Janeiro, 1992.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - ABNT. *NBR 7214*: areia normal para ensaio de cimento. Rio de Janeiro, 1982.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - ABNT. *NBR 7215*: cimento portland - determinação da resistência à compressão. Rio de Janeiro, 1996.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - ABNT. *NBR 7222*: argamassa e concreto – determinação da resistência à compressão diametral de corpos-de-prova cilíndrico. Rio de Janeiro, 1994.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - ABNT. *NBR 8522*: concreto – determinação do módulo estático de elasticidade à compressão. Rio de Janeiro, 2008.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - ABNT. *NBR 9770*: argamassa e concreto endurecidos – determinação da absorção de água por capilaridade. Rio de Janeiro, 1995.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - ABNT. *NBR 11172*: aglomerantes de origem mineral. Rio de Janeiro, 1990.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - ABNT. *NBR 12650*: materiais pozolânicos - determinação da variação da retração por secagem devida à utilização de materiais pozolânicos. Rio de Janeiro, 1992.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - ABNT. *NBR 12653*: materiais pozolânicos. Rio de Janeiro, 1992.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - ABNT. *NBR 12826*: cimento portland e outros materiais em pó – determinação do índice de finura por meio de peneirador aerodinâmico. Rio de Janeiro, 1993.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - ABNT. *NBR 15577-5*: agregados – reatividade álcali-agregado – parte 5 – determinação da mitigação da expansão em barras de argamassa pelo método acelerado. Rio de Janeiro, 2008.

AMERICAN CONCRETE INSTITUTE. - ACI -. *ACI 116R*: Cement and concrete terminology. Detroit, 2000. 73p.

AMERICAN CONCRETE INSTITUTE - ACI. *ACI 201.2R*: guide to durable concrete. Detroit, 2002. 41p.

AMERICAN CONCRETE INSTITUTE - ACI. *ACI 212.1R*: admixtures for concrete. Concrete International. Detroit, 1981. p.24-52.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS - ASTM. *ASTM C 1260*: standard test method for potential alkali reactivity of aggregates (mortar-bar method). West Conshohocken, 2005

BAGUANT, K. Properties of concrete with bagasse ash as fine aggregate. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON FLY ASH, SILICA FUME, SLAG AND NATURAL POZZOLANS IN CONCRETE - CANMET/ACI, 5, 1995, Milwaukee, *Proceedings...* Detroit: American Concrete Institute, 1995. v. 1, p. 315–337.

BARBOSA, M. P.; BERTOLUCCI, F. S.; PINTO, R. C. A.; PERES, L. D. P. Avaliação da energia aparente de ativação do cimento CP-II e CP-V com adição de superplastificantes. In: SIMPÓSIO EPUSP SOBRE ESTRUTURAS DE CONCRETO, 6, 2006, Recife. *Anais...* Recife: EPUSP, 2006. p. 518-532.

BILBA; ARSENE; OUENSANGA. Sugarcane bagasse fibre reinforced cement composites. Part 1. Influence of the botanical components of bagasse on the setting of bagasse/cement composite. *Cement and Concrete Composites*, Barking, v. 25, p. 91-96, 2003.

BORLINI, M. C.; MENDONÇA, J. L. C. C.; VIEIRA, C. M. F.; MONTEIRO, S. N. Influência da temperatura de sinterização nas propriedades físicas, mecânicas e microestruturais de cerâmica vermelha incorporada com cinza de bagaço de cana de açúcar. *Revista Matéria*, Rio de Janeiro, v.11, n. 4, p. 435-443, 2006. Disponível em <<http://www.materia.coppe.ufrj.br/sarra/artigos/artigo10799>>. Acesso em: 22 nov. 2007.

BRASIL. Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento. *Balanço nacional da cana-de-açúcar e agroenergia*. Brasília: MAPA/SPA, 2007a. 139p.

BRASIL. Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento. *Cadeia produtiva da agroenergia*. Brasília: IICA: MAPA/SPA, 2007b. 112p.

CALDAS, A.; MELO NETO, A. A.; JOHN, V. M.; PIRES SOBRINHO, C. W. A. Tecnologias alternativas para habitação: o uso de cinzas residuais para produção de novos materiais e componentes construtivos. In: CONGRESSO INTERNACIONAL DE TECNOLOGIA E GESTÃO DA QUALIDADE NA CONSTRUÇÃO CIVIL, 2, 2000, Recife. *Anais...* Recife: POLI-UPE. 2000. 12p.

CARMO, J. B. M.; PORTELLA, K. F.; VALDUGA, L. Análise comparativa de concretos compostos com sílica ativa e metacaulim. In: CONGRESSO BRASILEIRO DO CONCRETO, 49, 2007, Bento Gonçalves. *Anais...* São Paulo: Instituto Brasileiro do Concreto, 2007.

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

CORDEIRO, G. C.; TOLEDO FILHO, R. D.; FAIRBAIRN, M. R.; TAVARES, L. M. M. Otimização do processo de moagem ultrafina da cinza do bagaço de cana-de-açúcar visando sua utilização como aditivo mineral. In: CONGRESSO BRASILEIRO DO CONCRETO, 46, 2004, Florianópolis. *Anais...* São Paulo: Instituto Brasileiro do Concreto, 2004.p. 1356-1368.

CORDEIRO, G. C.; TOLEDO FILHO, R. D.; TAVARES, L. M.; FAIRBAIRN, E. M. R. Pozzolanic activity and filler effect of sugar cane bagasse ash in Portland cement and lime mortars. *Cement and Concrete Composities*, Barking, v. 30, p. 410-418. 2008

DAL MOLIN, D. C. C. Adições minerais para concreto estrutural. In: ISAIA, G. C. (Ed.). *Concreto: ensino, pesquisa e realizações*. São Paulo: Instituto Brasileiro do Concreto, 2005. v.1, capítulo 12, p. 345-380.

EDMEADES, R. M.; HEWLETT, P. C. Cement admixtures. In: HEWLETT, P. C. (Ed.) *Lea's chemistry of cement and concrete*. Oxford: Elsevier Butterworth-Heinemann Publishers. 2007, p. 841-905.

EMPRAPA GADO DE CORTE. Cana-de-açúcar: uma alternativa de alimento para a seca. Campo Grande, 2002. 7p. Disponível em: <<http://www.cnpqg.embrapa.br/publicacoes/cot/COT73.html>>. Acesso em: 8 nov. 2007.

FEDERAÇÃO DAS INDÚSTRIAS DO ESTADO DE SÃO PAULO/CENTRO DAS INDÚSTRIAS DO ESTADO DE SÃO PAULO - FIESP/CIESP. *Ampliação da oferta de energia através da biomassa (bagaço da cana-de-açúcar)*. São Paulo: FIESP/CIESP, 2001. 90p.

FIOMARI, M. C. *Análise energética e exergética de uma usina sucro-alcooleira do oeste paulista com sistema de co-geração de energia em expansão*. 2004. 130f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Faculdade de Engenharia, Universidade Estadual Paulista, Ilha Solteira, 2004.

FLATT, R. J.; HOUST, Y. F. A simplified view on chemical effects perturbing the action of superplasticizers. *Cement and Concrete Research*, Elmsford, v. 31, p. 1169-1176, 2001.

FREITAS, E. de S. *Caracterização da cinza do bagaço de cana-de-açúcar do município de Campos dos Goytacazes para uso na construção civil*. 2005. 81f.. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro, Campos dos Goytacazes, 2005.

FRÍAS, M.; VILLAR-COCIÑA, E.; ROJAS, M. I. S.; VALENCIA-MORALES, E. The effect that different pozzolanic activity methods has on the kinetic constants of the pozzolanic reaction in sugar cane straw-clay ash/lime systems: application of a kinetic-diffusive model. *Cement and Concrete Research*, Elmsford, n. 35, p. 2137-2142, 2005.

FRÍAS, M.; VILLAR-COCIÑA, E.; VALENCIA-MORALES, E. Characterization of sugar cane straw waste as pozzolanic material for construction: calcining temperature and kinetic parameters. *Waste Management*, Oxford, n.27, p. 533-538, 2007.

GANESAN, K.; RAJAGOPAL, K.; THANGAVEL, K. Evaluation of bagasse ash as supplementary cementitious material. *Cement and Concrete Composities*, Barking, v. 29, p. 515-524, 2007.

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

HOPPE, J. F.; CINCOTTO, M. A. Efeitos da cinza volante na resistência à compressão de concretos com alto teor de cinza volante e cal hidratada. In: CONGRESSO BRASILEIRO DO CONCRETO, 49, 2007, Bento Gonçalves. *Anais...* São Paulo: Instituto Brasileiro do Concreto, 2007.

JOHN, V. M. *Reciclagem de resíduos na construção civil: Contribuição para metodologia de pesquisa e desenvolvimento*. 2000. 113f. Tese (Livre Docência) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2000.

JOLICOUER, C. SIMARD, M. A. Chemical admixture-cement interactions: phenomenology and physico-chemical concepts. *Cement and Concrete Composites*, Barking, v. 20, n. 5, 1998, p. 87-101.

KIHARA, Y., CENTURIONE, S. L. O cimento portland. In: ISAIA, G. C. (Ed.). *Concreto: ensino, pesquisa e realizações*. São Paulo: IBRACON, 2005. v.1, p. 295-322.

MALHOTRA, V. M. (Ed.). *Proceedings of the international conference on superplasticizers and other chemical admixtures in concrete*. Farmington Hill: American Concrete Institute. 1994.

MALHOTRA, V. M. (Ed.). *Proceedings of the international conference on superplasticizers and other chemical admixtures in concrete*. Farmington Hill: American Concrete Institute. 1997.

MALHOTRA, V. M. (Ed.). *Proceedings of the international conference on superplasticizers and other chemical admixtures in concrete*. Farmington Hill: American Concrete Institute. 2000.

MALHOTRA, V. M. (Ed.). *Proceedings of the international conference on superplasticizers and other chemical admixtures in concrete*. Farmington Hill: American Concrete Institute. 2003.

MINISTÉRIO DA AGRICULTURA, PECUÁRIA E ABASTECIMENTO – MAPA. Dados estatísticos. Disponível em: <<http://www.agricultura.gov.br>> Acesso em: 20 fev. 2009.

MARTINS, C. H., ZANELLA, R. M., PAULINO JÚNIOR, Potencial do uso de cinza do bagaço e cana-de-açúcar como agregado miúdo. In: SEMINÁRIO DE ENGENHARIA URBANA DA UNIVERSIDADE ESTADUAL DE MARINGÁ, 1, 2007, Maringá. *Anais...* Maringá: Universidade Estadual de Maringá, 2007. p. 121-126. Disponível em: <<http://www.dec.uem.br/seuem/artigosseuem2007/13a.pdf>> Acesso em 12 nov. 2008.

MARTIRENA-HERNÁNDEZ, J. F.; MIDDENDORF, B.; GEHRKE, M.; BUDELMANN, H. Use of wastes of the sugar industry as pozzolana in lime-pozzolana binders: study of the reaction. *Cement and Concrete Research*. Elmsford, v. 28, n. 11, p. 1525-1536, 1998.

MARTIRENA-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 (primera parte). *Materiales de Construcción*, v.50, n. 260, p. 71-78, 2000.

MARTIRENA-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 (segunda parte). *Materiales de Construcción*, v.51, n. 261 p. 67-72, 2001.

MEHTA, P. K. Greening of the concrete industry for sustainable development. *Concrete International*, Farmington Hills, v. 24, n. 7, p. 23-28, 2002.

MEHTA, P. K.; MONTEIRO, P. J. M. *Concreto: estrutura, propriedades e materiais*. São Paulo: Pini. 1994. 616p.

MENOSSEI, R. T. *Utilização do pó de pedra basáltica em substituição a areia natural do concreto*. 2004. 97f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Faculdade de Engenharia, Universidade Estadual Paulista, Ilha Solteira, 2004.

MESA VALENCIANO, M. C., FREIRE, W. J. Características físicas e mecânicas de misturas de solo, cimento e cinzas de bagaço de cana-de-açúcar. *Engenharia Agrícola*, Jaboticabal, v. 24, n. 3, p. 484-492, 2004.

MONTEIRO, S. N.; RODRIGUEZ, R. J. S.; SOUZA, M. V.; D'ALMEIDA, J. R. M. Sugarcane bagasse waste as reinforcement in low cost composites. *Advanced Performance Materials*, Boston, v.5, p. 183-191, 1998.

MU'AZU, M. A. Influence of compactive effort on bagasse ash with cement treated lateritic soil. *Leonardo Electronic Journal of Practices and Technologies*, v.10, p.79-92, Jan.-June 2007.

NEVILLE, A. M. *Propriedades do Concreto*. 2. ed. São Paulo: Pini. 1997. 828p.

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

PAYÁ, J.; MONZÓ, J.; BORRACHERO, M. V.; DÍAZ-PNZÓN, L.; ORDOÑEZ, L. M. Sugar-cane bagasse ash (SCBA): studies on its properties for reusing in concrete production. *Journal of Chemical Technology and Biotechnology*, Oxford, n 77, p. 321-325, 2002.

PINTO, C. P. *Tecnologia da digestão anaeróbia da vinhaça e desenvolvimento sustentável*. 1999. 147f. Dissertação (Mestrado em Planejamento de Sistemas Energéticos) – Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 1999.

PRUDÊNCIO JÚNIOR., L. R. Concreto projetado. In: ISAIA, G. C. (Ed.). *Concreto: ensino, pesquisa e realizações*. São Paulo: Instituto Brasileiro do Concreto, 2005. v.2, capítulo 40, p. 1227-1257.

RIPOLI, T. C. C.; RIPOLI, M. L. C. *Biomassa de cana-de-açúcar: colheita, energia e ambiente*. Piracicaba: T. C. C. Ripoli, 2004. 302p.

SAEKI, T.; MONTEIRO, P. J. M. A model to predict the amount of calcium hydroxide in concrete containing mineral admixtures. *Cement and Concrete Research*, Elmsford, n. 35, p. 1914-1921, 2005.

SANTOS, M. R.; FORMAGINI, S. High performance concrete with addition of ultra fine sugarcane bagasse ashes. In: INTERNATIONAL ACI/CANMET CONFERENCE ON HIGH PERFORMANCE CONCRETE STRUCTURES AND MATERIALS, 5, 2008, Manaus. *Proceedings...* Manaus: ACI/CANMET, 2008.13p.

SIKA. *Manual Técnico*. [S.l.] Sika, 2006. CD-ROM.

SILVA, M. G. Cimentos portland com adições minerais. In: ISAIA G. C. (Ed). *Materiais de construção civil e princípios de ciência e engenharia de materiais*. São Paulo: IBRACON, 2007. v.1, capítulo 23, p. 761-793.

SILVA, D. J. F. Estudo dos efeitos do nitrato de lítio na expansão de argamassas sujeitas à reação álcali-sílica. 2007. 98f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Faculdade de Engenharia, Universidade Estadual Paulista, Ilha Solteira, 2007.

SINGH, N. B.; SINGH, V. D.; RAI, S. Hydration of bagasse ash-blended portland cement. *Cement and Concrete Research*. Elmsford, n. 30, p. 1485-1488, 2000.

SINDICATO NACIONAL DA INDÚSTRIA DO CIMENTO - SNIC. *Relatório anual 2006*. Rio de Janeiro. Disponível em: <<http://www.snic.org.br>>. Acesso em: 11 mar. 2008.

STRUBLE, L; GODFREY, J. How sustainable is concrete? In: INTERNATIONAL WORKSHOP ON SUSTAINABLE DEVELOPMENT AND CONCRETE TECHNOLOGY, 1., 2004, Beijing. *Proceedings...* Beijing: Center for Transportation Research and Education, 2004. p. 201-211.

TASHIMA, M. M. *Cinza de casca de arroz altamente reativa: método de produção, caracterização físico-química e comportamento em matrizes de cimento Portland*. 2006. 80f.

Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Faculdade de Engenharia, Universidade Estadual Paulista, Ilha Solteira, 2006.

TEIXEIRA, R. S. Bagaço na construção civil. *Agência FAPESP*, São Paulo, maio 2007. Disponível em: < <http://www.agencia.fapesp.br/materia/7211/noticias/bagaco-na-construcao-civil.htm>>. Acesso em: 12 nov. 2008.

THOMAZ, E. C. S.; CARNEIRO, L. A. V. Estruturas de reservatórios: conceitos de fissuração e sugestões para execução. *Revista IBRACON de Concreto e Construções*, São Paulo, n. 47, p. 19-23, 2007.

VAN VLACK, L. H. *Princípios de ciências dos materiais*. São Paulo: Edgard Blücher, 1970. 66p.

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

ZARDO, A. M. et al. Utilização da cinza do bagaço de cana-de-açúcar como filler em compostos de fibrocimento. In: CONFERÊNCIA LATINO-AMERICANA DE CONSTRUÇÃO SUSTENTÁVEL X ENCONTRO NACIONAL DE TECNOLOGIA DO AMBIENTE CONSTRUÍDO, 1, 2004, São Paulo. *Anais...* São Paulo: CLACS/ENTAC, 2004. 13p.

# APÊNDICE

## APÊNDICE A – RESULTADOS DE RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO

**Tabela 20** – Resultados individuais da resistência à compressão, aos 7, 28 e 56 dias.

Traço	7 DIAS			28 DIAS			56 DIAS		
	Carga ruptura (Kgf)	Resistência compressão (MPa)	Resist. média	Carga ruptura (Kgf)	Resistência compressão (MPa)	Resist. média	Carga ruptura (Kgf)	Resistência compressão (MPa)	Resist. média
Controle	8000	39,70	41,0	8000	39,70	41,1	8520	42,30	45,6
	8080	40,10		8200	40,60		9120	45,30	
	8360	41,50		8320	41,30		9200	45,70	
	8400	41,70		8400	41,70		9480	47,10	
	8480	42,10		8480	42,10		9600	47,70	
3%	7400	36,70	38,1	8520	42,30	44,7	9600	47,70	48,9
	7600	37,70		8840	43,90		9640	47,90	
	7760	38,50		9040	44,90		10000	49,70	
	7800	38,70		9160	45,50		10080	50,10	
	7800	38,70		9440	46,90		-	-	
5%	7240	35,90	38,8	9320	46,30	48,3	9480	47,10	50,3
	7640	37,90		9400	46,70		10120	50,30	
	7800	38,70		9480	47,10		10240	50,90	
	8000	39,70		10120	50,30		10360	51,50	
	8400	41,70		10240	50,90		10440	51,90	
8%	7240	35,90	37,6	8920	44,30	46,8	10480	52,10	54,2
	7440	36,90		9320	46,30		10760	53,50	
	7800	38,70		9400	46,70		10920	54,30	
	7840	38,90		9600	47,70		11000	54,70	
	-	-		9880	49,10		11400	56,60	
10%	8240	40,90	43,5	9920	49,30	51,0	10940	54,40	56,2
	8520	42,30		10080	50,10		11000	54,70	
	8720	43,30		10120	50,30		11120	55,30	
	9160	45,50		10240	50,90		11480	57,00	
	9200	45,70		10920	54,30		12040	59,80	

APÊNDICE B – RESULTADOS DE RESISTÊNCIA À TRAÇÃO POR COMPRESSÃO  
DIAMETRAL

**Tabela 21** - Resultados individuais da resistência à tração por compressão, aos 7, 28 e 56 dias.

Traço	7 DIAS			28 DIAS			56 DIAS		
	Carga ruptura (Kgf)	Resistência à tração (MPa)	Resist. Média (MPa)	Carga ruptura (Kgf)	Resistência à tração (MPa)	Resist. Média (MPa)	Carga ruptura (Kgf)	Resistência à tração (MPa)	Resist. média (MPa)
Controle	4030	5,40		4520	6		5200	6,90	
	4210	5,60		4840	6,4		5640	7,40	
	4250	5,60	5,7	5080	6,7	6,4	5640	7,40	7,2
	4370	5,80		-	-		-	-	
	4470	5,90		-	-		-	-	
3%	4680	6,20		5160	6,8		5400	7,10	
	4800	6,40		5200	6,9		5680	7,50	
	4840	6,40	6,4	5400	7,1	7,0	5960	7,90	7,5
	4880	6,50		5480	7,2		-	-	
	5000	6,60		-	-		-	-	
5%	4600	6,10		4600	6,1		4440	5,90	
	4720	6,30		4600	6,1		4560	6,00	
	4840	6,40	6,4	4680	6,2	6,1	4680	6,20	6,0
	4880	6,50		-	-		-	-	
	4920	6,50		-	-		-	-	
8%	4680	6,20		5000	6,6		4720	6,30	
	4800	6,40		5040	6,7		4840	6,40	
	5000	6,60	6,4	5240	6,9	6,7	4920	6,50	6,5
	-	-		-	-		4920	6,50	
	-	-		-	-		5080	6,70	
10%	4600	6,10		4880	6,5		4600	6,10	
	4800	6,40		4920	6,5		4640	6,20	
	4800	6,40	6,5	5200	6,9	6,6	4680	6,20	6,3
	5120	6,80		-	-		4760	6,30	
	5240	6,90		-	-		5080	6,70	

## APÊNDICE C – RESULTADOS INDIVIDUAIS DE ABSORÇÃO POR CAPILARIDADE

Tabela 22 - Resultado do ensaio de absorção por capilaridade aos 7 dias.

Corpo- de-prova	Massa (g)							Lâmina (cm)	
	0h	3h	6h	9h	24h	48h	72h		
<b>TRAÇO CONTROLE</b>									
C1	417,43	420,98	422,65	423,62	426,91	428,36	429,12	4,20	4,50
C2	416,98	421,98	423,96	425,09	429,99	432,4	433,63	7,40	7,10
C3	417,71	422,76	424,58	425,73	430,63	433,27	434,65	7,40	7,50
C4	416,22	418,77	420,02	420,87	424,44	426,48	427,54	5,10	5,40
C5	418,56	422,92	424,34	425,27	428,75	430,43	431,44	5,50	5,50
<b>TRAÇO 3%</b>									
C1	414,32	417,51	418,65	419,41	422,84	425,08	426,38	4,50	4,60
C2	417,17	420,96	421,32	422,03	425,25	427,09	428,07	4,50	4,30
C3	415,18	418,42	419,59	420,31	423,57	425,53	426,6	4,30	4,40
C4	415,56	418,32	419,06	419,61	422,17	423,72	424,48	3,50	3,50
C5	417,64	419,94	420,75	421,19	423,39	424,53	425,31	3,10	3,00
<b>TRAÇO 5%</b>									
C1	416,01	418,4	419,25	419,79	422,33	423,84	424,64	3,60	3,50
C2	415,7	418,57	419,74	420,53	423,8	425,5	426,33	4,20	4,10
C3	416,52	419,42	420,55	421,32	424,07	425,63	426,43	4,10	3,80
C4	417,78	419,91	420,83	421,49	424,65	425,04	425,84	3,50	3,30
C5	416,84	419,27	420,16	420,77	423,28	424,86	425,71	3,80	3,60
<b>TRAÇO 8%</b>									
C1	410,16	412,36	413,25	413,84	416,61	418,38	419,36	3,80	3,40
C2	411,57	413,8	414,74	415,36	417,61	419,16	419,83	3,20	3,10
C3	411,33	414,14	415,18	415,82	418,8	420,79	421,83	3,90	3,80
C4	411,09	413,91	415,07	415,76	419,01	421,1	422,38	4,10	4,20
C5	409,83	411,36	411,94	412,33	414,37	415,84	416,51	3,00	2,20
<b>TRAÇO 10%</b>									
C1	409,12	411,81	412,67	413,25	415,87	417,8	418,71	3,80	3,80
C2	408,37	410,54	411,29	411,81	414,11	415,58	416,59	2,90	3,00
C3	407,47	408,85	409,27	409,64	411,04	412,14	412,83	1,80	1,50
C4	406,64	408,76	409,39	409,87	411,78	412,9	413,66	1,90	2,40
C5	408,05	410,79	411,8	412,47	415,2	416,87	417,8	3,20	3,30

**Tabela 23** - Resultado do ensaio de absorção por capilaridade aos 28 dias.

Corpo- de-prova	Massa (g)							Lâmina (cm)	
	0h	3h	6h	9h	24h	48h	72h		
<b>TRAÇO CONTROLE</b>									
C1	428,10	431,69	434,12	435,81	441,14	447,97	450,76	3,40	2,80
C2	417,71	419,57	424,67	426,40	431,48	437,25	439,57	3,80	3,70
C3	421,10	427,25	430,12	431,98	438,14	445,99	448,56	3,50	3,80
C4	418,03	423,77	426,35	428,01	433,66	441,14	443,99	2,80	3,40
C5	419,50	425,75	428,66	430,84	436,65	444,42	447,05	3,60	3,20
<b>TRAÇO 3%</b>									
C1	411,33	414,82	416,51	417,64	421,26	426,00	427,97	6,10	6,30
C2	412,67	414,57	415,98	417,01	420,43	425,03	426,94	4,80	5,40
C3	415,10	418,42	420,01	421,11	424,68	429,30	431,33	5,70	5,80
C4	417,91	420,40	421,89	422,98	426,38	430,82	432,78	5,30	5,30
C5	414,42	417,56	419,08	420,09	423,42	427,74	429,57	5,60	5,40
<b>TRAÇO 5%</b>									
C1	413,48	416,26	417,62	418,56	421,63	425,73	427,54	5,00	5,40
C2	412,12	414,99	416,30	417,24	420,21	424,24	425,95	4,80	5,00
C3	413,15	415,30	416,60	417,49	420,78	424,95	426,85	4,80	5,10
C4	413,46	415,27	416,62	417,59	420,77	424,86	426,77	4,80	4,60
C5	415,46	417,90	419,30	420,27	423,48	427,58	429,40	5,50	5,30
<b>TRAÇO 8%</b>									
C1	412,08	414,49	415,91	416,87	419,83	423,68	425,45	4,80	5,00
C2	409,86	411,35	412,58	413,39	416,21	420,00	421,71	4,50	4,40
C3	408,61	410,88	412,29	413,25	418,24	420,06	421,80	4,50	4,70
C4	411,16	413,08	414,34	415,23	416,09	422,16	423,83	4,70	4,60
C5	408,11	410,08	411,33	412,23	415,09	418,93	420,58	4,50	4,50
<b>TRAÇO 10%</b>									
C1	398,85	400,84	401,83	402,52	404,85	408,10	409,37	2,80	2,80
C2	399,96	402,00	403,02	403,67	405,96	409,08	410,13	3,30	2,90
C3	399,66	401,66	402,68	403,35	405,75	409,27	410,57	3,00	3,40
C4	400,48	402,38	403,35	404,00	406,37	409,58	410,73	3,00	3,20
C5	398,08	400,89	401,03	401,74	404,03	407,10	407,84	2,80	3,60

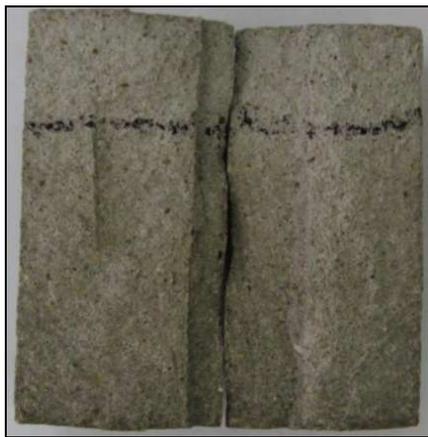
APÊNDICE D – IMAGENS DA DISTRIBUIÇÃO DE ÁGUA NOS CPS DO ENSAIO DE ABSORÇÃO POR CAPILARIDADE



(a)



(b)



(c)



(d)



(e)

**Figura 39** – CPs referentes ao traço controle, aos 7 dias.



(a)



(b)



(c)

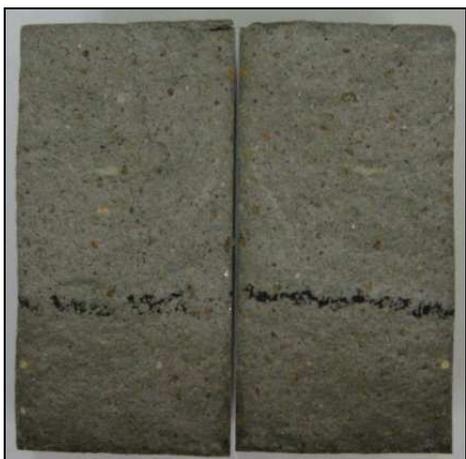


(d)



(e)

**Figura 40** - CPs referentes ao traço 3%, aos 7 dias



(a)



(b)



(c)



(d)



(e)

**Figura 41** - CPs referentes ao traço 5%, aos 7 dias



(a)



(b)



(c)



(d)



(e)

**Figura 42** – CPs referentes ao traço 8%, aos 7 dias.



(a)



(b)



(c)



(d)



(e)

**Figura 43** – CPs referentes ao traço 10%, aos 7 dias.



(a)



(b)



(c)



(d)



(e)

**Figura 44** – CPs referentes ao traço controle, aos 28 dias.



(a)



(b)



(c)



(d)



(e)

**Figura 45** – CPs referentes ao traço 3%, aos 28 dias.



(a)



(b)



(c)



(d)



(e)

**Figura 46** – CPs referentes ao traço 5%, aos 28 dias.



(a)



(b)



(c)



(d)



(e)

**Figura 47** – CPs referentes ao traço 8%, aos 28 dias.



(a)



(b)



(c)



(d)



(e)

**Figura 48** – CPs referentes ao traço 10%, aos 28 dias.

APÊNDICE E – RESULTADOS INDIVIDUAIS DA SORPTIVIDADE AOS 7 DIAS

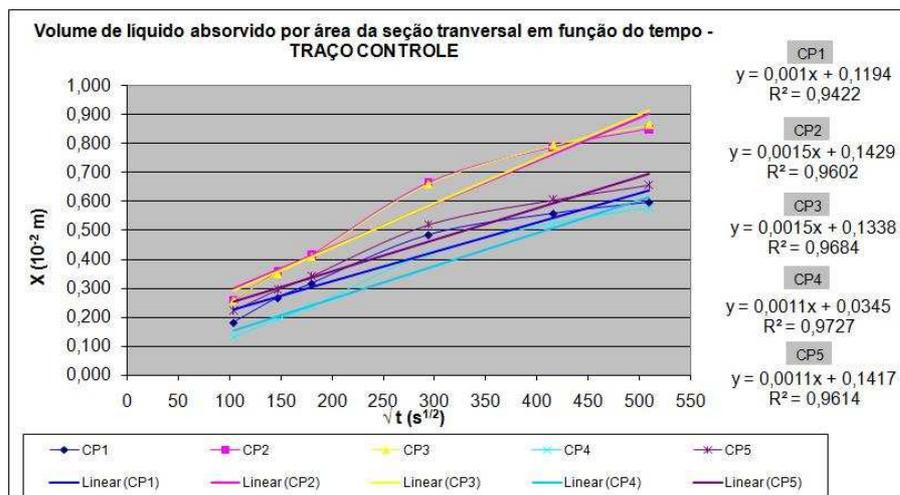


Figura 49 – Volume de líquido absorvido por área de seção transversal em função do tempo – traço controle.

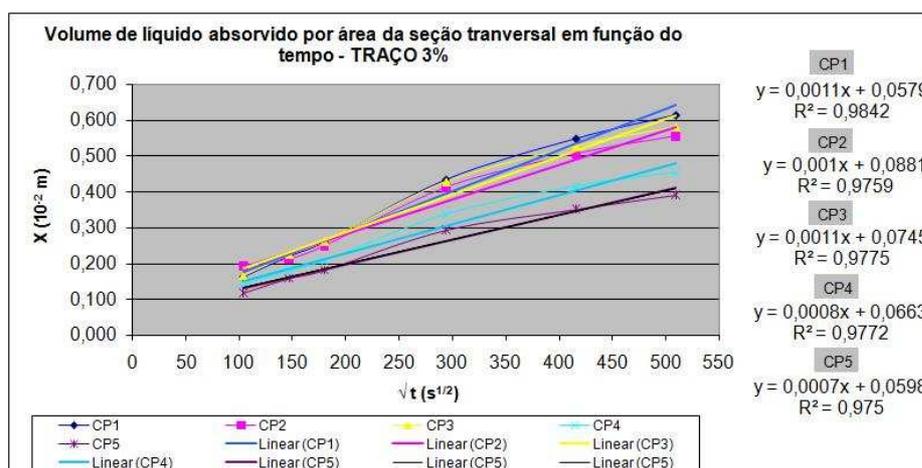


Figura 50 - Volume de líquido absorvido por área de seção transversal em função do tempo – traço 3%.

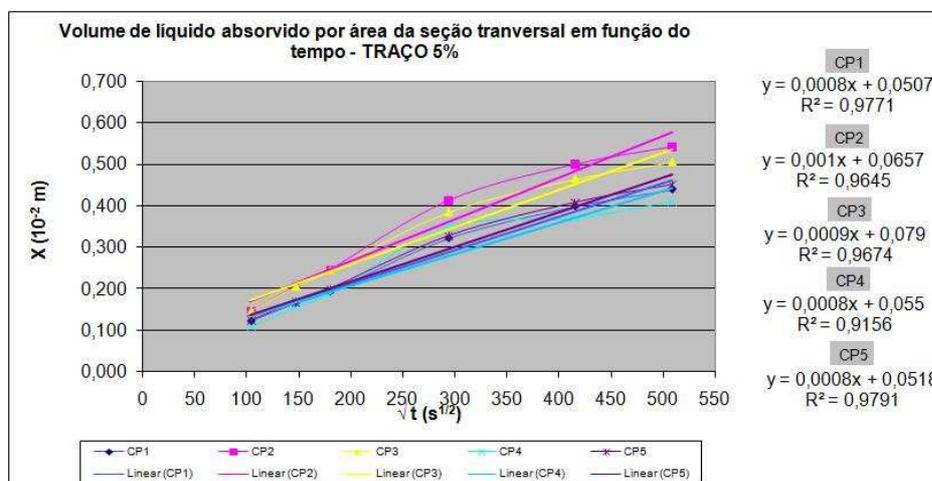


Figura 51 - Volume de líquido absorvido por área de seção transversal em função do tempo – traço 5%.

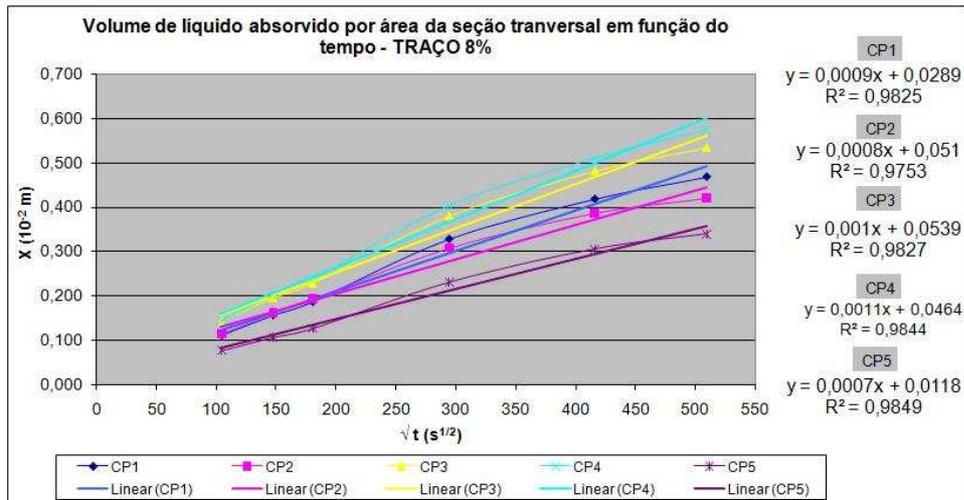


Figura 52 - Volume de líquido absorvido por área de seção transversal em função do tempo – traço 8%.

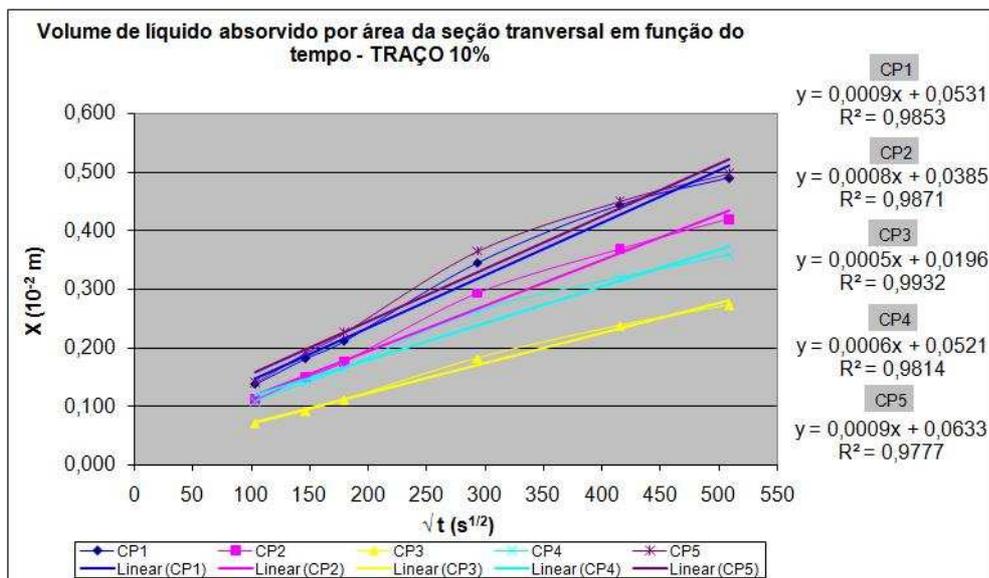


Figura 53 - Volume de líquido absorvido por área de seção transversal em função do tempo – traço 10%.

APÊNDICE F – RESULTADOS INDIVIDUAIS DA SORPTIVIDADE AOS 28 DIAS

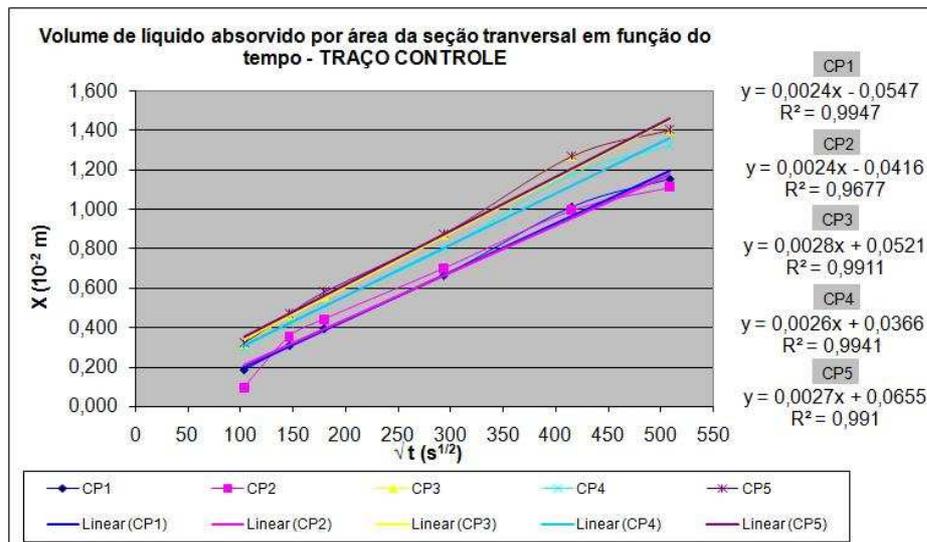


Figura 54 - Volume de líquido absorvido por área de seção transversal em função do tempo – traço controle.

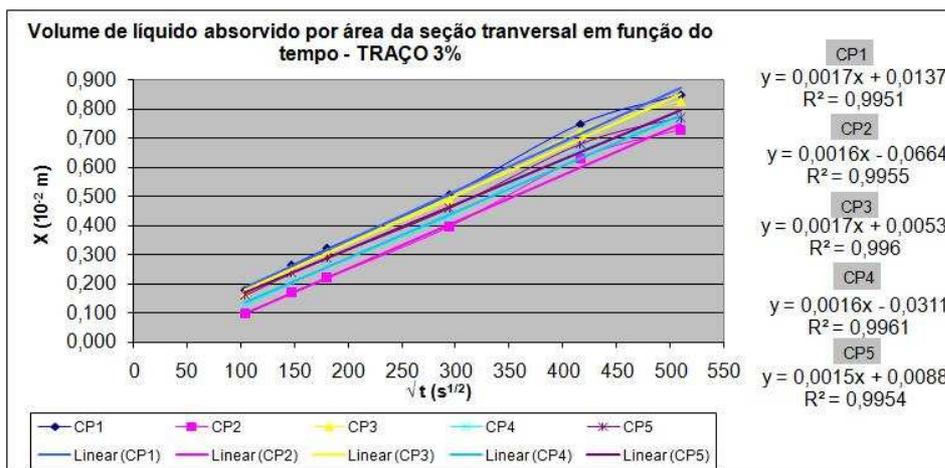


Figura 55 - Volume de líquido absorvido por área de seção transversal em função do tempo – traço 3%.

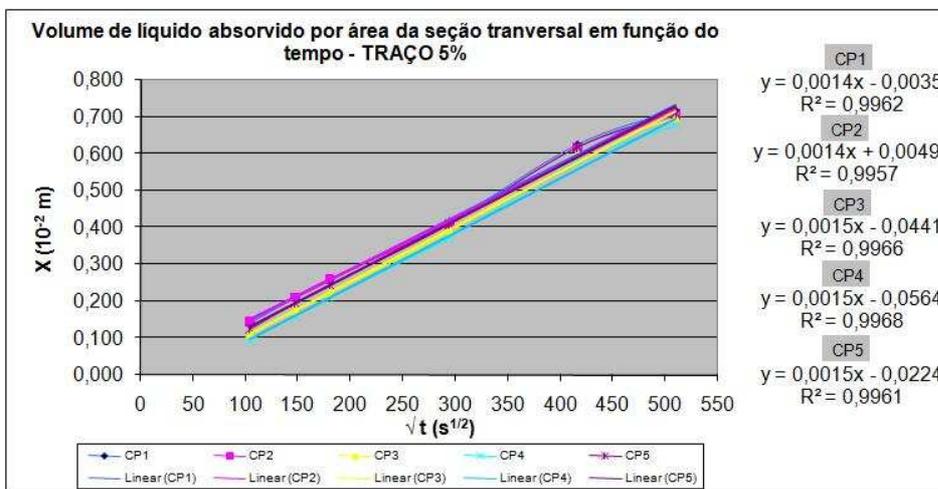


Figura 56 - Volume de líquido absorvido por área de seção transversal em função do tempo – traço 5%.

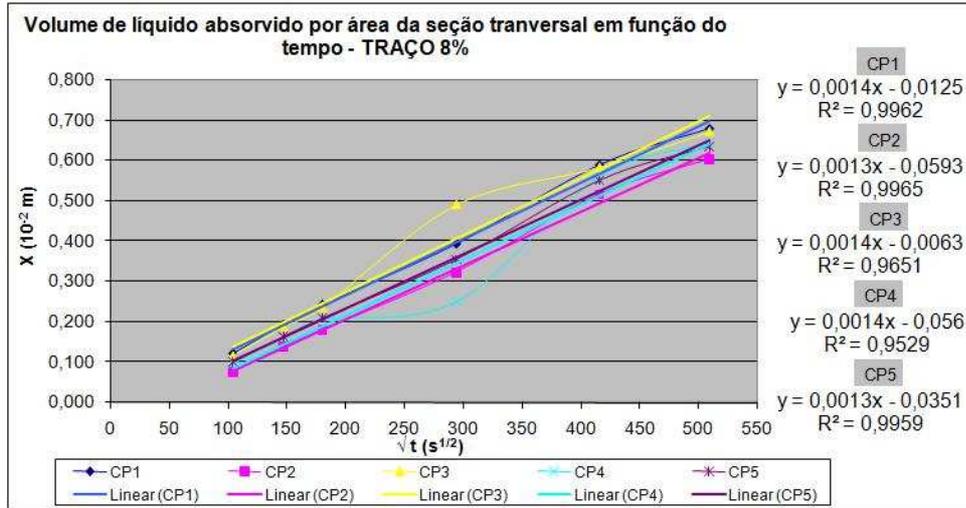


Figura 57 - Volume de líquido absorvido por área de seção transversal em função do tempo – traço 8%.

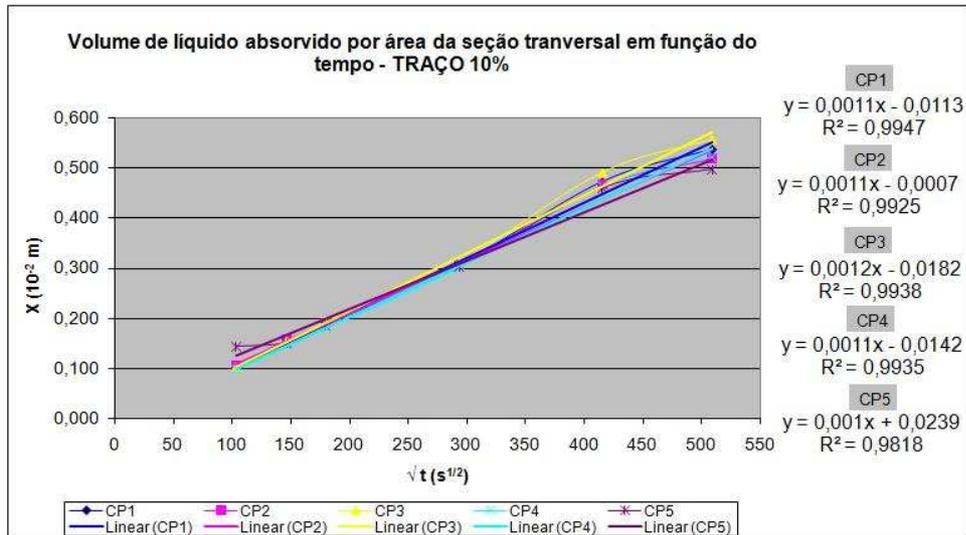


Figura 58 - Volume de líquido absorvido por área de seção transversal em função do tempo – traço 10%.