

**MARCOS OLIVEIRA DE PAULA**

**POTENCIAL DA CINZA DO BAGAÇO DA CANA-DE-AÇÚCAR  
COMO MATERIAL DE SUBSTITUIÇÃO PARCIAL DE CIMENTO  
PORTLAND.**

Dissertação apresentada à  
Universidade Federal de Viçosa, como  
parte das exigências do Programa de  
Pós-Graduação em Engenharia Agrícola,  
para obtenção do título de “Magister  
Scientiae”

VIÇOSA  
MINAS GERAIS – BRASIL  
2006

**Ficha catalográfica preparada pela Seção de Catalogação e  
Classificação da Biblioteca Central da UFV**

T

P324p  
2006

Paula, Marcos Oliveira de, 1979-

Pontencial da cinza do bagaço da cana-de-açúcar como material de substituição parcial de cimento Portland / Marcos Oliveira de Paula. – Viçosa : UFV, 2006. xv, 60f. : il. ; 29cm.

Orientador: Ilda de Fátima Ferreira Tinôco.

Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Viçosa.  
Referências bibliográficas: f. 55-60.

1. Resíduos como material de construção. 2. Resíduos agrícolas. 3. Bagaço de cana. 4. Cimento Portland. 5. Desenvolvimento sustentável. I. Universidade Federal de Viçosa. II. Título.

CDD 22.ed. 628.746

**MARCOS OLIVEIRA DE PAULA**

**Potencial da cinza do bagaço da cana-de-açúcar como material de substituição parcial de cimento Portland.**

Dissertação apresentada à Universidade Federal de Viçosa, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola, para obtenção do título de “Magister Scientiae”.

APROVADA: 22 de agosto de 2006.

---

Prof. Conrado de Souza Rodrigues  
(Co-Orientador)

---

Prof<sup>a</sup> Rita de Cássia Silva Sant’Anna  
Alvarenga

---

Prof<sup>a</sup> Cecília de Fátima Souza

---

Prof<sup>o</sup> Tadayuki Yanagi Junior

---

Prof<sup>a</sup> Ilda de Fátima Ferreira Tinôco  
(Orientadora)

A Deus, por tudo;  
Aos meus pais, Sebastião e Geralda, pela paciência, carinho e dedicação;  
Ao meu irmão Sérgio;  
À Elizabeth pelo amor, o nosso amor me estimula a transformar sonhos em  
realidade;  
À minha família;  
Aos meus verdadeiros amigos, que aqui eles se reconheçam!

## **AGRADECIMENTO**

A minha gratidão a todos que contribuíram para realização desta tese.

A Deus, por mais esta caminhada de sucesso em minha vida.

À Universidade Federal de Viçosa, nos seus diversos segmentos, em especial ao Departamento de Engenharia Agrícola e Ambiental e aos colegas da Área de Construções Rurais e Ambiente, pelo apoio recebido durante o meu trabalho.

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES), pela concessão da bolsa de estudos, o que viabilizou a realização deste trabalho.

A indústria de Cimento Barroso e a Usina Jatiboca.

À Prof<sup>a</sup> Ilda de Fátima Ferreira Tinôco, por ter confiado em mim e de quem eu tenho o maior orgulho de ter sido orientado e amigo. O nosso convívio contribuiu muito, sem dúvida, para o meu crescimento profissional e como ser humano.

Ao Professor Conrado de Souza Rodrigues, pela orientação durante toda a realização do meu trabalho.

Aos professores Fernando, Cecília, Valmir e Jadir, pelos ensinamentos e convívio durante todos estes anos.

Ao Laboratório de Engenharia Civil da UFV, ao Prof. Lauro Gontijo e aos técnicos Tarcisio, Toninho e José Carlos, a quem devo os ensaios mecânicos deste trabalho.

Aos laboratórios de: Painéis e Energia da UFV, Química da UFV, Química da UENF, Raios-X do Departamento de Física da UFV, Propriedades do Papel do Departamento de Engenharia Florestal da UFV Construções Rurais da UFV e ao Núcleo de Valorização de Materiais Minerais na UFOP.

Aos funcionários do DEA, em especial aos da secretaria da graduação e da pós-graduação, e ao Pedro, pela atenção que sempre me foi dada.

A todos os auxiliares de pesquisa, especialmente Lucas e Júlio Cassin, pelo empenho e pela amizade.

Aos meus pais, Sebastião e Geralda, e meu irmão Sérgio, pela força e incentivo que me deram para superar todos os obstáculos e poder realizar mais esta etapa em minha vida.

A minha noiva Elizabeth, pelo seu amor e compreensão nos momentos de estresse e de ausência em que tive que me dedicar ao trabalho.

A minha “quase” sogra, Ana Neire, pela paciência e carinho.

Aos amigos Sheila, Samuel, Paula, Leonardo Marota, Maila, Cleide e Carolina Brighenti, pela oportunidade de compartilhar alegrias.

A todos os amigos do AMBIAGRO, pela excelente companhia, amizade e apoio.

## **BIOGRAFIA**

MARCOS OLIVEIRA DE PAULA, filho de Sebastião Oliveira de Paula e Geralda do Nascimento Ferreira de Paula, nasceu em 20/07/1979, na cidade de São Paulo, estado de São Paulo.

Em março de 1999, ingressou no Curso de Engenharia civil na Universidade Federal de Viçosa, com término em julho de 2004.

Em agosto de 2004, iniciou o curso de Pós-Graduação (Mestrado) em Engenharia Agrícola na universidade Federal de Viçosa – UFV, MG, com concentração na área de Construções Rurais e Ambiente.

## CONTEÚDO

<b>LISTA DE FIGURAS</b> .....	ix
<b>LISTA DE TABELAS</b> .....	xi
<b>RESUMO</b> .....	xii
<b>ABSTRACT</b> .....	xiv
<b>1. INTRODUÇÃO</b> .....	<b>1</b>
<b>2. OBJETIVO</b> .....	<b>4</b>
2.1. Objetivo geral .....	4
2.1.1 Objetivos específicos .....	4
<b>3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA</b> .....	<b>5</b>
3.1 Cimento portland .....	5
3.2 Composição química do cimento portland .....	6
3.3 Hidratação do cimento .....	8
3.4 Tipos de cimentos mais comuns .....	10
3.4.1 Cimento portland alta resistência inicial .....	11
3.5 Aditivos para materiais a base de cimento .....	12
3.5.1 Adições minerais .....	12
3.5.1.1 Reação pozolânica .....	14
3.6 Produção de cimento com base em pozolanas .....	16
3.6.1 Avaliação da pozolanicidade .....	16
3.6.1.1 Análise química .....	16
3.6.1.2 Sílica amorfa .....	17
3.6.1.3 Finura .....	17
3.6.1.4 Resistência mecânica .....	18
3.7 Cinza do bagaço de cana-de-açúcar (CBC) como pozolana .....	18
3.7.1 Aspectos gerais .....	19
3.7.2 Produção de CBC .....	20
3.7.3 CBC com alto teor de carbono .....	21
3.7.4 Adição de CBC em cimento .....	21

<b>4. MATERIAL E MÉTODOS .....</b>	<b>23</b>
4.1 Caracterização da CBC .....	25
4.1.1 Caracterização química .....	29
4.1.1.1 Espectroscopia de fluorescência de raios-X .....	29
4.1.1.2 Difração de raios-X .....	30
4.1.2 Caracterização física .....	30
4.1.2.1 Distribuição granulométrica .....	30
4.1.2.2 Área de superfície específica .....	31
4.1.3 Pasta de cimento com adição de CBC .....	31
4.1.3.1 Escolha das combinações de cimento-cinza .....	32
4.1.3.2 Tempo de pega inicial e final .....	32
4.1.4 Caracterização mecânica .....	33
4.1.4.1 Argamassa de cimento com adição de CBC .....	33
4.1.4.2 Moldagem dos corpos de prova .....	34
4.1.4.3 Determinação da resistência à compressão .....	36
4.1.4.4 Determinação do índice de atividade pozolânica .....	37
4.1.4.5 Determinação da absorção de água por imersão (Absorção), índice de vazios (porosidade) e massa específica (densidade) .....	38
4.2 Delineamento Experimental.....	39
<b>5. RESULTADOS E DISCUSSÕES .....</b>	<b>40</b>
5.1 Caracterização química .....	40
5.1.1 Composição química .....	40
5.1.2 Difração de raios-X .....	41
5.2 Caracterização física .....	42
5.2.1 Composição granulométrica .....	42
5.2.2 Superfície específica .....	43
5.3 Pasta de cimento com adição de CBC .....	44
5.3.1 Tempo de pega inicial e final .....	44
5.4 Ensaio mecânicos .....	45
5.4.1 Resistência a compressão .....	45
5.3.1.1 Índice de atividade pozolânica .....	49

5.3.1.2	Determinação da absorção de água por imersão (absorção), índice de vazios (porosidade) e massa específica (densidade) .....	49
<b>6.</b>	<b>CONCLUSÃO</b> .....	<b>53</b>
	<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS</b> .....	<b>55</b>

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1.	Diagrama esquemático de desenvolvimento estrutural durante a hidratação do cimento Portland.....	9
Figura 2.	Evolução média de resistência à compressão dos distintos tipos de cimento portland .....	11
Figura 3.	Rota experimental esquemática desenvolvida nesse trabalho ....	24
Figura 4.	Geração de Bagaço de cana-de-açúcar na Indústria de Jatiboca: a) acúmulo de cinza no pátio da indústria; b) sítio de disposição nas imediações .....	25
Figura 5.	Mufla(M) e Gaseificador(G) usado para a queima do bagaço da cana-de-açúcar .....	26
Figura 6.	Bagaço da cana-de-açúcar antes e depois da queima .....	26
Figura 7.	Mufla com controlador usada para a requeima do bagaço da cana-de-açúcar .....	27
Figura 8.	Moinho de bola utilizado na moagem da CBC .....	28
Figura 9.	Cilindro e esferas utilizadas na moagem da CBC .....	28
Figura 10.	Cinza de CBC antes e após a moagem .....	29
Figura 11.	Aparelho de Vicat usado para realização do ensaio de tempo de pega inicial e final .....	33
Figura 12.	Moldagem dos corpos-de-prova .....	34
Figura 13.	Adensamento(a) e Armazenamento(b) do corpo-de-prova .....	35
Figura 14.	Corpos-de-prova submetidos à cura com cal .....	35
Figura 15.	Corpos-de-prova com combinações C1, C2, C3, C4 de cimento-cinza de CBC .....	36
Figura 16.	Capeamento dos corpos-de-prova .....	36
Figura 17.	Ensaio de resistência a compressão: (a) maquina Universal; (b) rompimento do corpo-de-prova .....	37
Figura 18.	Ensaio de absorção de água por imersão, índice de vazios e massa especifica .....	38
Figura 19.	Análise de difração de raio-X da CBC .....	41

Figura 20.	Distribuição granulométrica das amostras de CBC com diferentes tempos de moagem em moinho de bola .....	42
Figura 21.	Comportamento da superfície específica (SBET) para a CBC em função do tempo de moagem.....	43
Figura 22.	Diagrama da pega e endurecimento da pasta de cimento com adições de CBC .....	44
Figura 23.	Resistência à compressão aos 7 dias nas argamassas com diferentes concentrações de cimento e cinza de bagaço de cana-de-açúcar.....	46
Figura 24.	Resistência à compressão aos 28 dias nas argamassas com diferentes concentrações de cimento e cinza de bagaço de cana-de-açúcar.....	47
Figura 25.	Absorção de água por imersão aos 28 dias nas argamassas confeccionadas com diferentes concentrações de cimento e bagaço de cana-de-açúcar.....	50
Figura 26.	Índice de Vazios aos 28 dias nas argamassas confeccionadas com diferentes concentrações de cimento e bagaço de cana-de-açúcar.....	50
Figura 27.	Massa específica aos 28 dias nas argamassas confeccionadas com diferentes concentrações de cimento e bagaço de cana-de-açúcar.....	51

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1.	Componentes do cimento Portland, expressos como compostos individuais dos óxidos do clínquer, e suas abreviações .....	08
Tabela 2.	Alguns tipos de cimentos Portland mais comuns, siglas pelas quais são conhecidos internacionalmente e no Brasil .....	10
Tabela 3.	Composição química do cimento CPV ARI PLUS .....	31
Tabela 4.	Composição química da cinza do bagaço da cana-de-açúcar realizada por espectroscopia de fluorescência de raios X .....	40
Tabela 5.	Amostras de CBC com seus respectivo tempo de moagem .....	42
Tabela 6.	Tempos de pega de corpos de prova. Relação água/cimento = 0,32. Cimento CPV Ari Plus .....	45
Tabela 7.	Resultados de resistência à compressão na argamassa aos 7 e 28 dias .....	46
Tabela 8.	Resultados da análise de variância da resistência à compressão aos 7 e 28 dias na argamassa.....	47
Tabela 9.	Valores médios da resistência à compressão(fcm) aos 07 e 28 dias de idade na argamassa sem CBC e com adição de CBC no níveis de 10,20 e 30% (C2, C3, C4 respectivamente).....	48
Tabela 10.	Resistência média à compressão em MPa da argamassa aos 28 dias e respectivos índices de atividade pozolânico (IAP) para as diferentes misturas de cimento e cinza de bagaço de cana-de-açúcar.....	49
Tabela 11.	Resultados da análise de variância da Absorção de água por imersão, índice de vazios e massa específica aos 28 dias na argamassa (Abs H <sub>2</sub> O,28, IV28, Mesp,28, respectivamente).....	52
Tabela 12.	Valores médios da absorção de água, índice de vazios e massa específica aos 28 dias de idade na argamassa sem e com adição de CBC.....	52

## RESUMO

**DE PAULA, Marcos Oliveira, M.S., Universidade Federal de Viçosa, agosto de 2006.** Potencial da cinza do bagaço da cana-de-açúcar como material de substituição parcial de cimento Portland. Orientadora: Ilda de Fátima Ferreira Tinôco. Co-orientadores: Conrado de Souza Rodrigues e Fernando da Costa Baêta

Este trabalho teve como objetivo avaliar o potencial da CBC como material de substituição parcial do cimento Portland em argamassa. A CBC empregada é um resíduo gerado na usina de açúcar Jatiboca, localizada no município de Urucânia-MG. A utilização do bagaço da cana de açúcar como fonte de cinza como adição mineral em materiais à base de cimento obedece a dois fatores: o rendimento de cinza e a sua constituição química. A cinza do bagaço da cana-de-açúcar (CBC) é composta predominantemente por dióxido de silício, o qual, dependendo das características de queima e da granulometria, pode desenvolver atividade pozzolânica. Neste caso, a reatividade entre sílica e os produtos de hidratação podem acarretar em melhoria nas propriedades físicas e mecânicas dos materiais à base de cimento com incorporação de resíduos. O trabalho foi dividido em duas fases: caracterização da CBC e avaliação do seu emprego como adição em argamassa através de ensaios mecânicos e físicos. Os resultados mostraram que o bagaço apresenta um rendimento de CBC de 10%. A cinza de CBC apresenta 84% de  $\text{SiO}_2$  e 5% de carbono. A sílica na CBC apresenta-se tanto na fase amorfa quanto nas fases cristalinas de Cristobalita e Quartzo. Os resultados encontrados para a composição granulométrica e área de superfície demonstraram que a cinza em estudo é composta por partículas com tamanhos entre 1 e 14  $\mu\text{m}$  e com uma área de superfície específica da ordem de 24  $\text{m}^2/\text{g}$ . Com relação ao estudo do tempo

de pega inicial e final, foi observado que as adições de 10%, 20% e 30% de CBC acarretaram um retardo de 10 min no intervalo entre os tempos de pega. Os resultados encontrados para os índices de atividade pozolânica comprovam a reatividade da CBC. Observou-se que as argamassas com maiores teores de cinza tendem a ser mais porosas, o que justifica os maiores valores de absorção encontrados. Com relação à massa específica, a substituição parcial do cimento Portland por até 30% de cinzas na mistura não provocou qualquer modificação significativa. Os ensaios de compressão das argamassas com teores de CBC entre 0 e 30%, aos 7 e 28 dias, indicaram a possibilidade de substituição de até 20% do cimento pela CBC, sem prejuízo da resistência.

## ABSTRACT

**DE PAULA, Marcos Oliveira, M.S., Universidade Federal de Viçosa, August 2006.** Potential of the sugarcane bagasse ash as a partial replacement material for cement Portland. Adviser: Ilda de Fátima Ferreira Tinôco. Co-Advisers: Conrado de Souza Rodrigues and Fernando da Costa Baêta.

This study was carried out to evaluate the potential of the sugarcane bagasse ash (CBC) as partial replacement material for the Portland cement in mortar. A residue generated at the Jatiboca sugar mill located in Uruçânia county-MG was used as CBC. The use of the sugarcane bagasse as an ash source for mineral addition into cement-based materials is subjected to two factors: the production and chemical constitution of the ash. The sugarcane bagasse ash (CBC) is predominantly composed by silicon dioxide, that can develop pozzolan activity depending on the characteristics of both burning and grain size. In this case, the reactivity between silica and the hydration products may improve the physical and mechanical properties of the cement-based materials with incorporated residues. The work was divided into two phases: CBC characterization and the evaluation of its addition to mortar, by using mechanical and physical assays. According to the results, the sugarcane bagasse showed 10% CBC production. CBC presents 84% SiO<sub>2</sub> and 5% carbon. The CBC silica is shown either in amorphous phase and crystalline phase of Cristobalite and Quartz. Concerning to grain size and surface area, the ash under study is composed by either particles at the size range from 1 to 14 µm and specific surface area of 24 m<sup>2</sup>/g. When considering the initial and final time of the mortar hardening, it was observed that the additions of 10%, 20% and 30% CBC caused a 10min delay in the interval between the times of mortar hardening. Relative to pozzolan activity indexes, the results corroborate the reactivity by CBC. It was also observed that the mortars with higher ash contents tend to be more porous, which justifies the highest values found for absorption. Regarding the specific mass, the partial substitution of the Portland

cement up to 30% ashes in the mixture provoked no significant modification. The mortar compression assays with CBC contents between zero and 30%, that were accomplished at 7<sup>th</sup> and 28<sup>th</sup> days pointed out the possibility for replacement up to 20% cement by CBC with no damaged resistance.

## 1. INTRODUÇÃO

A sustentabilidade das atividades econômicas é um dos principais desafios enfrentados pela humanidade neste século XXI. É urgente e necessário, a busca por desenvolvimento de projetos voltados ao uso racional dos recursos naturais ou à recuperação do meio ambiente. Essas ações devem visar, basicamente, satisfazer necessidades técnicas e sócio-econômicas, porém sem comprometer a qualidade de vida da população atual ou das futuras gerações.

O aumento da população e o conseqüente aumento da demanda por habitação têm levado os países em desenvolvimento a buscarem novas alternativas, especialmente aquelas voltadas para o aproveitamento dos recursos naturais locais, e aproveitamento dos subprodutos gerados em atividades industriais. A utilização desses materiais provenientes de resíduos são vantajosos não apenas por causa do aumento da atividade industrial, mas, principalmente, devido à redução no estoque de matéria prima proveniente de recursos naturais não renováveis, que atualmente são extraídos de maneira indiscriminada, muitas vezes irracional.

O meio rural, além de atividades agropecuárias e florestais, abriga também atividades industriais como produção de açúcar e álcool, mineração, abate de animais e etc., que geram grandes quantidades de resíduos poluentes, quase sempre perigosos à biota e danosos ao meio ambiente.

Grande parte desses resíduos pode ser reciclado, reutilizado, transformado e incorporado, de modo a produzir novos materiais de construção e atender à crescente demanda por tecnologia alternativa de construção mais simples, eficiente e econômica, para satisfazer principalmente à população de baixa renda.

A reciclagem destes materiais apresenta inúmeras vantagens, dentre elas: uma redução no volume de resíduos destinados a aterros sanitários e, conseqüentemente, uma diminuição no risco de contaminação do meio ambiente; redução do volume de extração de matéria prima necessária à produção de materiais para construção, preservando, assim, os recursos naturais não renováveis. Além disso, diminui significativamente a liberação de CO<sub>2</sub> para a atmosfera, gerado em grande quantidade durante a produção do cimento Portland e da cal, tanto pela queima do combustível quanto pela descarbonatação da rocha calcária.

A indústria da construção civil sempre foi caracterizada pela carência de qualidade em seus produtos e por uma filosofia altamente esbanjadora. É tida como uma das maiores emissoras de CO<sub>2</sub> para o meio ambiente, responsável por aproximadamente 5% da emissão do CO<sub>2</sub> global, sendo que, o concreto, produto a base de cimento Portland, é um dos materiais mais utilizados do planeta. A fabricação de cimento Portland no mundo é da ordem de 1,7X10<sup>9</sup> t/ano, o suficiente para produzir 6 km<sup>3</sup> de concreto por ano, ou 1 m<sup>3</sup> por pessoa, e ainda, para a produção de 1 m<sup>3</sup> de concreto são emitidos em torno de 0,2 t de CO<sub>2</sub> e por 1 t de concreto são emitidos 0,08 t de CO<sub>2</sub> (GARTNER, 2004).

Uma construção sustentável deve basear-se na prevenção e redução dos resíduos pelo desenvolvimento de tecnologias limpas, no uso de materiais recicláveis ou reutilizáveis, no uso de resíduos como materiais secundários e na coleta e deposição inerte.

Ao incorporar um resíduo ao cimento Portland altera-se as características dos aglomerantes, entretanto, em condições específicas, podem ser preservadas, e até melhoradas as características de desempenho dos componentes produzidos com aglomerantes a partir da incorporação de resíduos (na forma de adição mineral). Não menos importante, a incorporação de resíduo ao cimento poderá possibilitar a redução da quantidade de clínquer por m<sup>3</sup> de concreto/argamassa. Isso acarretaria em uma redução dos impactos ambientais gerados pela indústria cimenteira, principalmente os impactos provenientes da emissão de CO<sub>2</sub> e energia de produção.

Existe uma infinidade de resíduos de origem renovável com potencial para geração de energia através da queima, que podem ser empregados na construção civil e que ainda são ignorados pelo mercado por pesquisadores.

Alguns resíduos geram consideráveis quantidades de cinza, que demandam condições específicas para sua disposição. Dentre os resíduos destacam-se as cinzas minerais oriundas de diferentes atividades agroindustriais, que apresentam altas porcentagens de sílica e de outros óxidos, podendo ser então utilizadas como pozolanas.

A principal propriedade de uma pozolana é a sua capacidade de reagir com o hidróxido de cálcio, formando compostos estáveis de poder aglomerante tais como os silicatos e aluminatos de cálcio hidratados.

As poucas pesquisas realizadas sobre o assunto encontram-se concentradas na cinza da casca de arroz, que apresenta teores de SiO<sub>2</sub> usualmente entre 80 e 90%. Contudo, investigações demonstram que as cinzas de bagaço de cana-de-açúcar podem ter o mesmo poder de utilização, requerendo, entretanto, estudos mais aprofundados.

A aplicação do bagaço da cana de açúcar como fonte de cinza obedece a dois fatores: o rendimento da cinza e a sua constituição química. É importante salientar que a cana-de-açúcar está sendo cada vez mais empregada como fonte renovável de combustível, indicando um aumento substancial da geração de cinzas do bagaço da cana-de-açúcar (CBC), esta, altamente silicosa.

JOHN et al (2003) destaca a semelhança entre as composições químicas da cinza do bagaço de cana-de-açúcar e da cinza da casca de arroz, pozolana de alta reatividade. Entretanto, a composição granulométrica variada apresentada pela cinza residual indica a necessidade de moagem mecânica das partículas, pois a redução do tamanho das partículas e o conseqüente aumento da superfície específica proporcionam uma maior reatividade à cinza.

Diante do exposto, torna-se fundamental realizar estudos que busquem avaliar as propriedades da cinza da cana-de-açúcar como material pozolânico, com objetivo de verificar a possibilidade futura da utilização desse material, como suplemento na produção de argamassa e concretos de cimento Portland.

## **2. OBJETIVO**

### **2.1. Objetivo Geral**

Esta pesquisa teve como objetivo geral avaliar o potencial de utilização da cinza do bagaço da cana-de-açúcar como aditivo mineral na produção de pastas e argamassas de cimento Portland, visando contribuir com a diminuição no volume de resíduos industriais destinados a aterros sanitários e, conseqüentemente, a diminuição da contaminação ambiental; redução da extração de matéria-prima para produção de cimento, buscando a preservação dos recursos naturais; diminuição da emissão de gases para atmosfera, e contribuindo para o desenvolvimento sustentável.

### **2.2. Objetivos Específicos**

- Caracterizar quimicamente a cinza do bagaço da cana-de-açúcar;
- Analisar fisicamente a estrutura da cinza do bagaço da cana-de-açúcar;
- Investigar o comportamento mecânico da argamassa de cimento com adição de diferentes teores de cinza do bagaço da cana-de-açúcar.

### **3. REVISÃO BIBLIOGRAFICA**

#### **3.1. Cimento portland**

A palavra cimento é originada do latim *CAEMENTU*, que designava na velha Roma, espécie de pedra natural de rochedos. A origem do cimento remonta de cerca de 4.500 anos. Os imponentes monumentos do Egito antigo já utilizavam uma liga constituída por uma mistura de gesso calcinado. As grandes obras gregas e romanas, como o Panteão e o Coliseu, foram construídas com o uso de solos de origem vulcânica da ilha grega de Santorim ou das proximidades da cidade italiana de Pozzuoli, que possuíam propriedades de endurecimento sob a ação da água (SNIC, 2004).

O grande passo no desenvolvimento do cimento foi dado em 1756 pelo inglês John Smeaton, que conseguiu obter um produto de alta resistência por meio de calcinação de calcários moles e argilosos. Em 1818, o francês Vicat obteve resultados semelhantes aos de Smeaton, pela mistura de componentes argilosos e calcários. Ele é considerado o inventor do cimento artificial. Em 1824, o construtor inglês Joseph Aspdin queimou conjuntamente pedras calcárias e argila, transformando-as num pó fino, percebeu que obtinha uma mistura que, após secar, tornava-se tão dura quanto as pedras empregadas nas construções. A mistura não se dissolvia em água e foi patenteada pelo construtor no mesmo ano, com o nome de cimento Portland, que recebeu esse nome por apresentar cor e propriedades de durabilidade e solidez semelhantes às rochas da ilha britânica de Portland (ABCP, 2002).

No Brasil, a primeira tentativa de aplicar os conhecimentos relativos à fabricação do cimento Portland ocorreu aparentemente em 1888, quando o comendador Antônio Proost Rodovalho empenhou-se em instalar uma fábrica em sua fazenda em Santo Antônio, Estado de São Paulo. Posteriormente, várias iniciativas esporádicas de fabricação de cimento foram desenvolvidas.

Assim, chegou a funcionar durante três meses em 1892, uma pequena instalação produtora na ilha de Tiriri, na Paraíba. A usina de Rodovalho operou de 1897 a 1904, voltando em 1907 e extinguindo-se definitivamente em 1918. Em Cachoeiro do Itapemirim, o governo do Espírito Santo fundou, em 1912, uma fábrica que funcionou até 1924, sendo então paralisada, voltando a funcionar em 1936, após modernização (ABCP, 2005).

Na década de 70, a produção cresceu intensamente, com uma elevação do patamar de 9,8 milhões de toneladas por ano para 27,2 milhões de toneladas no início dos anos 80, período em que a recessão da economia nacional provocou queda no consumo e instabilidade política. Ao longo dos anos 90 houve uma retomada no crescimento do consumo, que provocou grande aumento de produção. A produtividade desenvolvida na época da estagnação foi extremamente eficaz para a obtenção dos resultados nessa fase. O ano de 1999 foi recorde em produção, alcançando 40,2 milhões de toneladas de cimento devido, especialmente, ao advento do Plano Real. A partir de 2000, a produção sofreu nova queda resultante das sucessivas crises mundiais e conseqüente instabilidade econômica. A produção de cimento do Brasil gira em torno de 34,4 milhões de toneladas (SNIC, 2004).

### **3.2. Composição química do cimento portland**

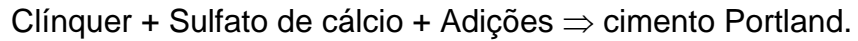
O cimento Portland é um material pulverulento, constituído de silicatos e aluminatos de cálcio, praticamente sem cal livre. Esses silicatos e aluminatos complexos, ao serem misturados com água, hidratam-se e produzem o endurecimento da massa, que pode então oferecer elevada resistência mecânica, o cimento Portland resulta da moagem do clínquer<sup>1</sup>(PETRUCI, 1998).

Suas matérias-primas devem conter cálcio, silício, alumínio e ferro em formas e proporções adequadas, para posterior produção dos silicatos constituintes do cimento. O carbonato de cálcio é encontrado naturalmente como pedra calcária, giz, mármore e conchas do mar, tendo argila e dolomita como principais impurezas.

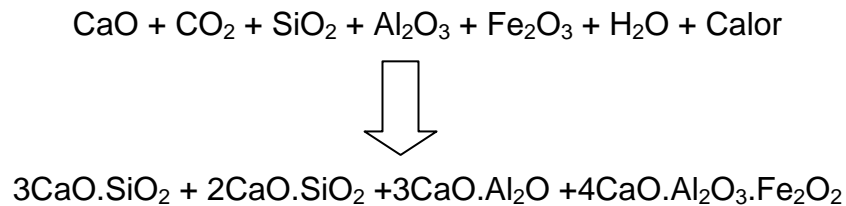
---

<sup>1</sup> Cozimento até a fusão incipiente ( $\pm 30\%$  de fase líquida) de mistura de calcário e argila convenientemente dosada e homogeneizada, de tal forma que toda cal se combine com os compostos argilosos, sem que, depois do cozimento, resulte cal livre em quantidade prejudicial.

Segundo MEHTA & MONTEIRO (1998), as reações químicas que ocorrem para a formação do cimento podem ser representadas por:



Em representação estequiométrica, tem-se:



O silicato tricálcico ( $3\text{CaO}.\text{SiO}_2$ ) e o silicato dicálcico ( $2\text{CaO}.\text{SiO}_2$ ) são os constituintes fundamentais na composição química do cimento, por serem eles os responsáveis pela resistência mecânica da pasta. O aluminato tricálcico ( $3\text{CaO}.\text{Al}_2\text{O}$ ) é componente que se hidrata mais rápido, mas tem pouca contribuição para a resistência mecânica da pasta, já o ferro-aluminatotetracálcico ( $4\text{CaO}.\text{Al}_2\text{O}_3.\text{Fe}_2\text{O}_2$ ) praticamente não contribui para a resistência mecânica da pasta a longo prazo, tendo a função de equilibrar a composição química da pasta por apresentar boa estabilidade química (MEHTA & MONTEIRO, 1998).

Embora o cimento Portland consista essencialmente de vários compostos de cálcio, os resultados de análises químicas de rotina são expressos em termos de óxidos dos elementos presentes. Além disso, costuma-se designar os componentes do cimento usando-se abreviações conforme apresentadas na Tabela 1 (SEGREE, 1999).

**Tabela 1:** Componentes do cimento Portland, expressos como compostos individuais dos óxidos do clínquer, e suas abreviações (SEGREE, 1999).

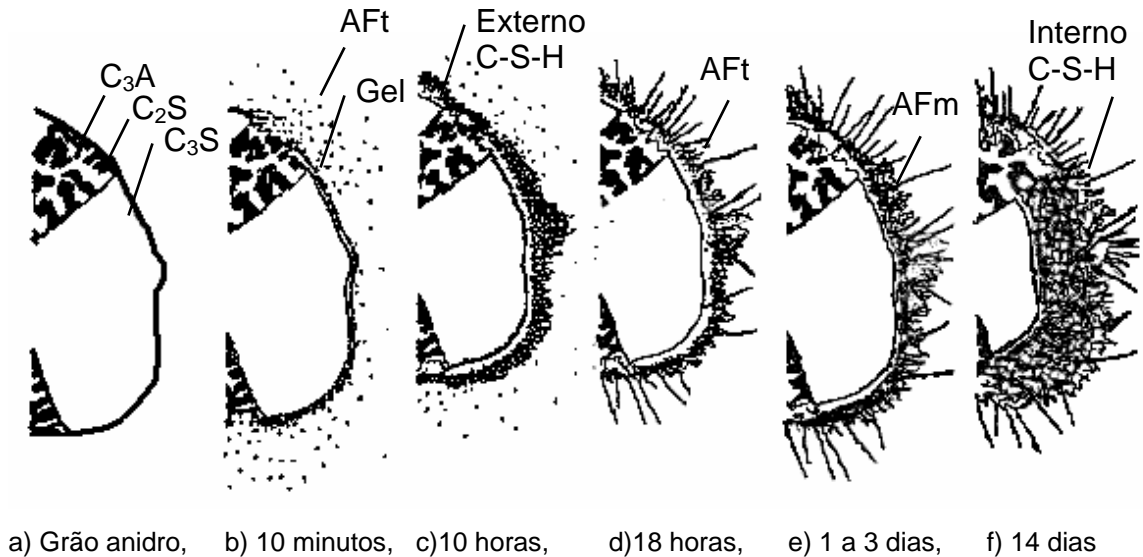
óxido	abreviação	composto	abreviação
CaO	C	$3\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$	$\text{C}_3\text{S}$
$\text{SiO}_2$	S	$2\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$	$\text{C}_2\text{S}$
$\text{Al}_2\text{O}_3$	A	$3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$	$\text{C}_3\text{A}$
$\text{Fe}_2\text{O}_3$	F	$4\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{Fe}_2\text{O}_3$	$\text{C}_4\text{AF}$
MgO	M	$4\text{CaO} \cdot 3\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{SO}_3$	$\text{C}_4\text{A}_3\text{S}$
$\text{SO}_3$	S	$3\text{CaO} \cdot 2\text{SiO}_2 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$	$\text{C}_3\text{S}_2\text{H}_3$
$\text{H}_2\text{O}$	H	$\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$	$\text{CSH}_2$

### 3.3. Hidratação do cimento

Misturando-se certa quantidade de água ao cimento obtém-se a pasta, mistura que começa a perder a plasticidade com o tempo, até endurecer completamente. O tempo que decorre entre a adição de água até o início das reações com os componentes do cimento é chamado tempo de início de pega. O início dessas reações é caracterizado pelo aumento brusco da viscosidade e pela elevação da temperatura. Quando a pasta passa a ser indeformável para pequenas cargas e se torna um bloco monolítico (rígido), atinge-se o fim da pega. A partir daí, inicia-se a fase de endurecimento, na qual as reações no interior da pasta prosseguem, aumentando a coesão e resistência. Os silicatos de cálcio, que correspondem a 75% da composição do cimento, reagem com a água formando silicatos de cálcio hidratados e hidróxido de cálcio, que é responsável pelo pH alcalino da pasta de cimento. As reações de hidratação dos silicatos de cálcio são apresentadas abaixo; entre parênteses são apresentadas as mesmas reações de acordo com a notação adotada para a química do cimento (PETRUCCI, 1998):

O processo de hidratação do cimento é acompanhado pela liberação de energia na forma de calor, ou seja, as reações são exotérmicas. Segundo TAYLOR (1990) citado por SEGRE (1999), a hidratação completa do cimento Portland tipo I (para uma relação água/cimento (a/c)=0,40, em massa, e temperatura= 21°C) gera aproximadamente  $400\text{J} \cdot \text{g}^{-1}$  de energia.

Na Figura 1 é mostrado um diagrama esquemático do desenvolvimento da microestrutura durante a hidratação do cimento Portland observado através da microscopia (FREITAS, 2001).



**Figura 1.** Diagrama esquemático de desenvolvimento estrutural durante o período de hidratação do cimento Portland (FREITAS, 2001).

A figura 1 representa o desenvolvimento da resistência com o tempo.

- a) Seção de um grão anidro de cimento Portland em contato com água;
- b) O grão começa a reagir e a concentração de íons na solução aumenta. Nesse início da hidratação formam-se lâminas de C-S-H (silicato de cálcio hidratado) na superfície do  $C_3S$  e um gel amorfo rico em aluminato na superfície do  $C_3A$ , onde aparece a nucleação de pequenas agulhas de Aft (fase de formação da etringita<sup>2</sup>). Após uma hora de hidratação formam-se pequenos bastões de etringita;
- c) Período de aceleração, quando ocorre um rápido crescimento do C-S-H e CH (hidróxido de cálcio). É a reação do  $C_3S$  para produzir C-S-H externo sobre a malha de AFt, deixando  $1\ \mu\text{m}$  entre a superfície do grão e a “carapaça” ou “casca” hidratada. A morfologia do C-S-H é laminar e o CH precipita-se nos poros saturados como placas hexagonais;

<sup>2</sup> Primeiros cristais formados (sulfoaluminato de cálcio hidratado).

- d) Crescimento secundário da AFt. Nesse estágio, como consequência da continuidade da hidratação do C<sub>3</sub>S o C-S-H começa a se formar no interior da carapaça hidratada;
- e) Formação de discos hexagonais de AFm (fase de formação de monossulfato) decorrente da hidratação do C<sub>3</sub>A com o AFt. A contínua formação de produtos internos reduz a separação entre os grãos anidros e a concha hidratada;
- f) Forma-se C-S-H interno suficiente para preencher o espaço entre os grão e a carapaça. As estruturas observadas em “e” e “f” indicam a evolução da hidratação nas idades mais avançadas, quando os poros estão significativamente reduzidos.

### 3.4. Tipos de cimentos mais comuns

Quando se produz pasta, argamassa ou concreto, a primeira escolha a ser feita é a do cimento, pois a natureza do mesmo influi no processo de hidratação, na consistência, na resistência da pasta e nas propriedades do concreto fresco e endurecido (PETRUCCI, 1998).

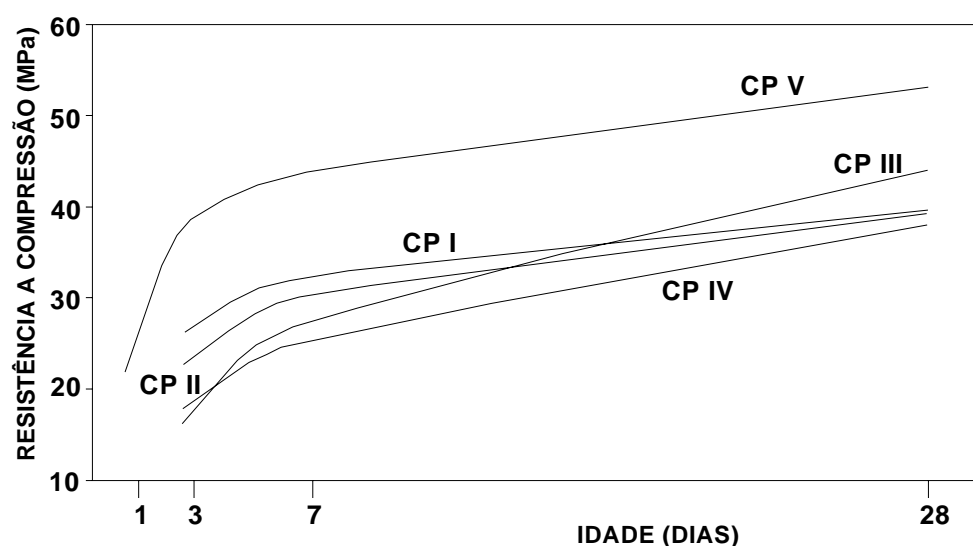
A Tabela 2 apresenta alguns tipos de cimento Portland, segundo a ABNT (Associação Brasileira de Normas Técnicas) (BASILIO, 1983).

**Tabela 2.** Alguns tipos de cimentos Portland mais comuns, siglas pelas quais são conhecidos internacionalmente e no Brasil.

<b>CP I</b>	Cimento portland comum
<b>CP I – S</b>	Cimento portland comum com adição
<b>CP II – E</b>	Cimento portland composto com escória de alto forno
<b>CP II – Z</b>	Cimento portland composto com pozolana
<b>CP II – F</b>	Cimento portland composto com filler (Calcário)
<b>CP III</b>	Cimento portland de alto forno
<b>CP IV</b>	Cimento portland pozolânico
<b>CP V – ARI Plus</b>	Cimento portland alta resistência inicial
<b>CP V - ARI – RS</b>	Cimento portland alta resistência inicial e resistente a sulfatos

### 3.4.1. Cimento portland de alta resistência inicial

O cimento portland de alta resistência inicial (CPV - ARI Plus), embora contemplado pela ABNT como norma separada do cimento portland comum, é na verdade, um tipo particular deste, que tem a peculiaridade de atingir altas resistências já nos primeiros dias da aplicação (Figura 2). O desenvolvimento da alta resistência inicial é conseguido pela utilização de uma dosagem diferente de calcário e argila na produção do clínquer, bem como pela moagem mais fina do cimento, de modo que, ao reagir com a água, ele adquira elevadas resistências, com maior velocidade (ABCP,2002).



**Figura 2.** Evolução média de resistência à compressão dos distintos tipos de cimento portland (fonte: ABCP, 2002).

Há, entretanto, uma tendência mundial de abandonar a classificação do cimento de alta resistência como sendo um tipo específico do qual se exijam limitações de composição. Assim, a classificação do cimento de alta resistência inicial como qualquer tipo de cimento portland (comum, composto, de alto-forno, pozolânico) que apresente adicionalmente a propriedade de desenvolver altas resistências iniciais já é adotada nos países da União Européia. O mesmo fato deverá ocorrer no Brasil com os trabalhos de revisão da norma brasileira NBR 5733, no âmbito do Mercosul para adoção de norma única nos países integrantes desse Mercado (ABCP, 2002).

### **3.5. Aditivos para materiais à base de cimento**

O entendimento de que as propriedades da argamassa e concreto podem ser modificadas com a utilização de certos materiais adicionados ao concreto deram um impulso à indústria de aditivos. Centenas de produtos têm sido comercializados e, em alguns países, não é raro o fato de cerca de 80% do concreto produzido conter algum aditivo. Os aditivos variam na composição química e muitos desempenham mais de uma função. São empregados, por exemplo, para aumentar a plasticidade do concreto, reduzir a exsudação<sup>3</sup> e a segregação<sup>4</sup>, retardar a taxa de evolução de calor, controlar o desenvolvimento da resistência e retardar ou acelerar o tempo de pega (MEHTA & MONTEIRO, 1994).

#### **3.5.1. Adições minerais**

As principais adições minerais utilizados na produção de argamassas e concretos são: a sílica ativa, cinza volante, escória de alto forno e metacaulim. No Brasil, o mais utilizado é a escória (GOMES, 1995).

A sílica ativa é encontrada comercialmente nas formas de pó ou pasta aquosa. A primeira, geralmente, é usada na forma compactada, por problemas de manuseio, armazenagem e transporte. A segunda tem contribuído por eliminar o perigo de contato com o pó e melhorar a dispersão do aditivo na massa do concreto. Estas diferentes formas têm levado a pouca diferença nas propriedades do concreto endurecido, porém podem influenciar nas propriedades da argamassa e concreto fresco. A escolha é limitada pela disponibilidade, economia e considerações de serviço (BARATA, 1998).

Os efeitos benéficos da sílica ativa nas propriedades da argamassa e concreto são devidos ao efeito pozolânico e ao efeito físico das partículas de sílica, denominado de efeito filler<sup>5</sup> (DE LARRARD et al., 1992).

De acordo com MASSAZZA (1998), originalmente o termo pozolana se refere a um grupo específico de rochas da região de Pozzouli, em torno de

---

<sup>3</sup> Tendência da água de amassamento de vir à superfície do concreto recém lançados.

<sup>4</sup> Ato de separação dos materiais constituintes da argamassa e ou concreto.

<sup>5</sup> Agregados mais fino, constituídos por partículas minerais de dimensões inferiores a 0,0075 mm.

Roma, na Itália. Entretanto, o termo é empregado de forma mais genérica, englobando todos os materiais inorgânicos, naturais ou artificiais, que se enrijecem em água quando na presença de cal ou materiais que liberam  $\text{Ca(OH)}_2$ , como o cimento Portland. Desta forma, torna-se difícil uma classificação precisa das pozolanas, uma vez que o termo se aplica a uma vasta gama de materiais, de diferentes composições químicas, natureza mineralógica e origem geológica, e que são relacionados apenas pela propriedade geral de enrijecer na presença de água e cal.

COOK (1986) expressa reservas quanto ao uso generalizado do termo pozolana na designação de uma grande variabilidade de materiais, preferindo se referir às rochas vítreas piroclásticas como pozolanas e os demais materiais como aditivos minerais. Neste contexto, aditivos minerais são compostos por pozolanas naturais, argilas calcinadas, cinzas volantes, microssílica e cinzas provenientes de resíduos agrícolas.

O controle de qualidade dos aditivos minerais se faz tão importante quanto o controle do cimento, pois variações de suas propriedades físicas ou químicas podem causar apreciáveis variações nas propriedades da argamassa e concreto. Por isso, é extremamente importante que os aditivos minerais sejam testados quanto à sua uniformidade e compatibilidade com os outros materiais da mistura antes de serem usados (ALMEIDA, 1990).

De maneira bastante genérica pode-se dizer que os efeitos dos diversos tipos de adições minerais são bastante similares quando hidratadas junto com o clínquer de cimento Portland. Cimentos com adição ótima de materiais pozolânicos apresentam melhores propriedades a longo prazo que a poucas idades. Em termos de resistência, embora esta possa ser maior nos cimentos com adições minerais a longo prazo, em geral a taxa de ganho de resistência é menor que nos cimentos sem adição (MASSAZZA, 1998).

De acordo com RODRIGUES (2004), as adições minerais podem ser empregados em cimentos de duas formas: moídos juntamente com o clínquer ou adicionados ao cimento portland durante o amassamento. Ainda, segundo o autor, a definição quanto ao emprego de uma determinada adição mineral a materiais à base de cimento é governada por três fatores principais:

1. Quantidade de carbono: em excesso o carbono interfere na ação de alguns aditivos, como agentes incorporadores de ar, além de conferir cor escura ao material; além disso, pode comprometer o comportamento mecânico e interferir no processo de hidratação.
2. Capacidade de promover melhor trabalhabilidade: principalmente em argamassas e concretos, os aditivos minerais podem melhorar a trabalhabilidade através da dispersão e defloculação das partículas de cimento (mesmo mecanismo de ação dos aditivos para redução de água).
3. Atividade pozolânica: embora a resistência mecânica aos 28 dias seja mais dependente da relação água/cimento, propriedades como resistência e permeabilidade a idades avançadas dependem da atividade pozolânica.

A fase ativa dos diferentes aditivos minerais é composta basicamente por sílica. Assim, o termo “atividade pozolânica” refere-se às reações entre sílica, a cal e é comumente avaliada em termos do consumo de  $\text{Ca(OH)}_2$  (MASSAZZA, 1998).

A atividade pozolânica possui dois parâmetros principais: a quantidade de cal que pode ser combinada ao material pozolânico e a taxa na qual esta reação ocorre. Além disso, na avaliação da atividade pozolânica deve-se ter em conta a atividade dos demais componentes, como alumina, que podem fazer parte da fase ativa, bem como o relativamente longo período necessário para que a reação pozolânica se complete (MASSAZZA, 1998).

A quantidade de cal combinada ao aditivo mineral e o equilíbrio entre as frações de cal combinada e livre no sistema dependem da relação  $\text{Ca(OH)}_2/\text{SiO}_2$ ; já a taxa de atividade depende fortemente da área de superfície específica das partículas e composição (MASSAZZA, 1998).

#### **3.5.1.1. Reação pozolânica**

As reações de hidratação do silicato tricálcico,  $\text{C}_3\text{S}$ , e silicato dicálcico,  $\text{C}_2\text{S}$ , dão origem ao silicato de cálcio hidratado, C-S-H, e hidróxido de cálcio, CH. O C-S-H não tem composição fixa e é responsável pela resistência do cimento,

enquanto o CH é solúvel e influencia na durabilidade da pasta, principalmente quando sujeita a meios ácidos (MEHTA & MONTEIRO, 1998).

De acordo com RICHARDSON (2000), o C-S-H resultante da hidratação do cimento apresenta relação Ca/Si em torno de 1,7 a 1,8, variando pouco com a idade. Devido à sílica ativa do aditivo mineral empregado (20% microssílica em relação a massa do cimento), o CH resultante da hidratação é rapidamente consumido e a razão Ca/Si do C-S-H cai para 0,7 a 0,8 possivelmente como resultado da nucleação, que faz diminuir a quantidade de íons  $\text{Ca}^{2+}$  disponíveis na hidratação.

MITCHELL et al. (1998) observou que as partículas de microssílica permanecem na pasta mesmo após 180 dias de hidratação. Na parte interna destas partículas foi constatado um alto teor de Si em relação ao Ca,  $\text{Si/Ca} = 3$ , enquanto que nas regiões periféricas a proporção é bem menor,  $\text{Si/Ca} = 0,5$ .

Assim, admite-se que a reação pozolânica ocorra na superfície das partículas do aditivo formando uma película de C-S-H que impede que a reação pozolânica prossiga no interior das partículas com a mesma dinâmica com que ocorre na superfície.

Clínquer e pozolana apresentam processos de reação bastante diferentes, cada um reagindo em diferentes estágios da hidratação. A reação pozolânica tem início entre 7 e 15 dias após a mistura, quando a hidratação do cimento se apresenta já em estado avançado. Assim, as reações do clínquer e da pozolana podem ser investigadas separadamente, sendo consideradas as influências mútuas dos dois processos (RODRIGUES, 2004).

Após o primeiro dia, a hidratação do cimento com incorporação de aditivo mineral envolve unicamente o clínquer, sendo observado que as partículas do aditivo comportam-se como regiões de nucleação para o crescimento dos produtos de hidratação. Em estágios mais avançados, a superfície externa destas partículas parece alterada, dando início ao consumo destas partículas. Primeiramente, as partículas são recobertas por uma fina camada de composição diversa daquela das partículas. Gradualmente, esta camada passa a ser substituída por agulhas de C-S-H que crescem perpendicularmente à superfície (RODRIGUES, 2004).

MASSAZZA (1998) ressalta que os produtos de hidratação de um sistema cal/aditivo mineral são bastante similares àqueles resultantes da hidratação do

cimento portland, ocorrendo variação mais na quantidade que na natureza das fases.

A atividade pozolânica pode ser classificada em termos de propriedades químicas, físicas e mecânicas, sendo observado que os resultados dos diferentes métodos têm pouca correlação (COOK, 1986).

Os métodos mecânicos expressam a atividade pozolânica em termos da resistência à compressão, embora seja bem estabelecido que o consumo de  $\text{Ca(OH)}_2$  não tem relação com resistência mas a geração do C-S-H tem influência direta com a resistência. Ainda como desvantagem, deve-se levar em conta que o ganho de resistência em misturas de cal ou cimento dá-se mais lentamente devido à incorporação de aditivos minerais (COOK, 1986).

Quimicamente, as pozolanas podem ser classificadas através da determinação da cal consumida. Já a classificação física se dá através de ensaios de difração de raios-X, onde é possível determinar as fases cristalinas da sílica (COOK, 1986).

### **3.6. Produção de cimento com base em pozolanas**

A produção de cimento com base em pozolanas implica a sua mistura com uma fonte de cálcio. Em termos práticos, as pozolanas são misturadas com cimento Portland ou cal hidratada. A mistura com cimento Portland propiciam maior resistência inicial em relação a mistura com a cal, uma vez que a hidratação da fração clínquer fornece resistência nas primeiras idades (JOHN et al, 2003).

#### **3.6.1. Avaliação da pozolanicidade**

##### **3.6.1.1. Análise química**

Na avaliação de uma pozolana, é sempre fundamental realizar uma análise química completa. Essa análise pode ser realizada por diferentes métodos, como os espectroscópicos – fluorescência de raios X, ou por métodos clássicos por via úmida. O teor de  $\text{SiO}_2$  nas pozolanas consideradas reativas, por CINCOTTO & KAUPATEZ (1988) foi de 44%.

Como algumas das pozolanas são produzida em processo de combustão, o teor de carbono presente também deve ser controlado. MEHTA (1992), relata emprego de pozolanas com até 18% de carbono e NEVILLE (1982) cita autores que consideram que teores de até 12% não causam prejuízos. O carbono não participa das reações de hidratação e sua presença significa, em menor teor real de pozolana disponível para a reação. Adicionalmente, a presença de carbono pode afetar o consumo de água de amassamento, além de afetar a coloração do produto final.

### **3.6.1.2. Sílica amorfa**

Além da composição química, é fundamental a determinação do teor de vidro ou de material vítreo. O teor de vidro pode ser avaliado através da difração de Raios X. Materiais contendo vidro silicoso apresentam um halo<sup>6</sup> centrado em torno de  $2\theta=22^\circ$ . A esse halo podem ser sobrepostos picos de cristobalita, mulita, tridimita e quartzo. Existe método que permite estimar a fração cristalina presente por integração da área do halo, mas apresenta a dificuldade de necessitar de um padrão com composição semelhante à do vidro (MILLET et al., 1977).

### **3.6.1.3. Finura**

Alguns autores consideram que apenas partículas abaixo de  $15\mu\text{m}$  possuem atividade pozolânica (ISAIA, 1995). Embora confirmada por resultados experimentais, esse fato é consequência de uma combinação de fatores:

- a) A área de superfície específica ( $\text{m}^2/\text{g}$ ) cresce na razão inversa da diminuição do diâmetro ou superfície específica varia em função do quadrado da variação do diâmetro;
- b) Partículas menores resfriam-se mais rapidamente e, conseqüentemente, apresentam maiores teores de vidro;
- c) No caso de pozolanas produzidas pela calcinação de vegetais em que a sílica é originalmente amorfa, a elevação da temperatura próxima a

---

<sup>6</sup> Forma esférica.

pontos de fusão provoca a aglomeração de partículas e recristalização da sílica.

#### **3.6.1.4. Resistência mecânica**

Nos ensaios com mistura de cimento-pozolana, a resistência à compressão aos 28 dias de argamassa de corpos-de-prova cilíndricos de 5 cm de diâmetro e 10 cm de altura, traço 1:3 em massa (aglomerante:agregado) de cimento Portland sem pozolana, é comparada com a resistência de uma mistura com traço idêntico e mesma consistência, em que 30% do volume do cimento foi substituído por pozolana. A eficiência da pozolana é avaliada pela relação entre essas duas resistências, devendo a mistura ter resistência superior a 75% da resistência da argamassa com cimento Portland empregado (JOHN et al., 2003).

### **3.7. Cinza do bagaço de cana-de-açúcar (CBC) como pozolana**

Da queima nas caldeiras do bagaço de cana-de-açúcar, para fins de geração de energia nas indústrias sucro-alcooleiras, produz-se cinza como material residual. Do total de bagaço queimado, cerca de 10% se transforma em cinzas. A aplicação do bagaço da cana de açúcar como fonte de cinza para adição mineral obedeceu a dois fatores: o rendimento da cinza (em torno de 15%) e a sua constituição química (em torno de 80% de  $\text{SiO}_2$ ). Além da sílica, a cinza contém álcalis e traços de óxido de ferro, alumínio, cálcio e magnésio (FREITAS et al., 1998).

CINCOTTO (1983) analisou a atividade pozolânica da CBC e concluiu que ela se comporta como um cimento pozolânico, muito embora a viabilidade de seu uso dependa ainda de outras verificações e novos estudos como, por exemplo, a condição de queima e moagem da cinza.

A finura e área específica da cinza é outro requisito importante. Em primeiro lugar, a área de contato do sólido com o meio aquoso é fundamental na taxa de reação e precipitação de produtos hidratados, ou seja, o aumento da área de superfície resulta em um aumento na velocidade de ganho de resistência mecânica. No entanto, a eficiência do aumento da finura decresce devido ao

fato de as partículas menores, de elevada área superficial, tenderem a aglomeração ainda no estado seco, exigindo energias de mistura elevada, incompatíveis com os equipamentos hoje existentes, ou o emprego de aditivos para aumentar a dispersão e, conseqüentemente, a superfície de reação. A finura é também importante no manuseio do aglomerante ainda no estado fresco: é ela que dá coesão à pasta, controla fenômenos como exsudação da água e garante a trabalhabilidade ao sistema, condições sem as quais o produto não pode ser facilmente empregado com os procedimentos usuais de construção (JOHN et al., 2003).

### **3.7.1. Aspectos gerais**

A agroindústria açucareira é a mais antiga atividade econômica do Brasil e está relacionada aos principais eventos históricos do país. O Brasil é atualmente o maior produtor mundial de cana-de-açúcar, maior produtor de açúcar e álcool e maior exportador mundial de açúcar. Cultiva aproximadamente 5 milhões de hectares com uma produção de 337 milhões de toneladas de cana, 14,4 milhões de toneladas de açúcar e 13 bilhões de litros de álcool (FNP – Consultoria&Comércio, 2005) .

O bagaço é gerado durante a extração do caldo por meio da moagem da cana-de-açúcar. Cerca de 95% de todo o bagaço produzido no Brasil é queimado em caldeiras para geração de vapor, formando a cinza de bagaço. Para cada tonelada de bagaço queimado são produzidos cerca de 147 kg de cinza. Desta forma, tem-se em torno de 47,1 milhões de toneladas de cinza disponíveis anualmente no país. Todavia, é necessário dar um destino final à cinza residual proveniente da queima do bagaço usado como combustível. Os principais estados produtores são: São Paulo (58%), Alagoas (7%), Minas Gerais (6%) e Mato Grosso (5%). O bagaço da cana-de-açúcar é composto aproximadamente por 50% de celulose, 25% de hemicelulose e 25% de lignina. Após a queima, a parte remanescente é um material cuja composição química revela a presença predominante de dióxido de silício, no qual devido às características de queima e granulometria pode desenvolver atividade pozolânica (CORDEIRO et al., 2004).

### 3.7.2. Produção de CBC

As propriedades da CBC dependem fortemente das condições de queima, sendo que as modificações ocorridas no bagaço da cana de açúcar durante o processo podem ser descritas da seguinte maneira;

- Inicialmente, a perda de massa ocorrida a temperaturas até 100° C resulta da evaporação da água absorvida;
- À cerca de 350° C inicia a ignição do material mais volátil, dando início à queima do bagaço da cana-de-açúcar;
- Entre 400 e 500° C, o carbono residual é oxidado, sendo neste estágio observada a perda mais substancial da massa. Após esta etapa a cinza torna-se rica em sílica amorfa;
- O emprego de temperaturas acima de 700° C pode levar à formação de quartzo, e níveis ainda mais elevados de temperatura podem acarretar na formação de outras formas cristalinas;
- Acima de 800° C, a sílica presente na CBC é essencialmente cristalina.

A quantidade e forma de sílica na cinza dependem não só da temperatura, como também do período de queima, sendo citado que períodos mais longos a temperaturas de 500 a 680° C por menos de um minuto resultam em sílica totalmente amorfa (COOK, 1986).

Tais limites de tempo e temperatura de queima não são, entretanto, consenso em diferentes trabalhos, sendo citada a presença de sílica totalmente amorfa em cinza obtida da queima à 900° C por menos de uma hora (RODRIGUES, 2004). Além de influenciar no grau de cristalinidade da sílica na cinza, as condições de queima também afetam a área de superfície específica das partículas, propriedade com estreita relação com a reatividade da cinza (COOK, 1986).

Em cinzas obtidas de condições controladas de queima, a área de superfície específica é função principalmente do volume de microporos na superfície das partículas. Nestes casos, a área de superfície específica é relativamente insensível às variações no tamanho das partículas até que se obtenha partículas com dimensões da ordem do diâmetro dos microporos

(COOK, 1986). Assim, variações nas condições de queima podem causar grandes modificações nos valores de área de superfície específica através da diminuição da microporosidade superficial das partículas, decorrente do colapso e coalescência da rede de poros (COOK, 1986).

### **3.7.3. CBC com alto teor de carbono**

A microporosidade e irregularidades das partículas de CBC que conferem altos valores de área de superfície específica são relacionadas à quantidade de carbono presente na cinza. Para queima entre 450 e 500° C, o carbono é mantido na cinza, que apresenta cor negra, sendo amorfo e combinado a outros elementos (COOK, 1986). Além disso, a incineração do bagaço de cana-de-açúcar em condições não controladas gera cinza que pode conter altos teores de carbono e matéria orgânica.

O carbono que se mantém na cinza pode ser retirado, queimando-se novamente o material. Entretanto, a retirada de carbono numa segunda queima a temperaturas mais elevadas demanda tempo e pode modificar a estrutura da sílica contida na cinza (COOK, 1986).

Em materiais à base de cimento com incorporação de cinza, a presença de até cerca de 20% de carbono na cinza não afeta significativamente a resistência à compressão. Entretanto, o decréscimo na resistência mecânica passa a ter relevância quando são empregadas cinzas com mais de 30% de carbono. Nestes casos, a queda na resistência se dá principalmente devido à queda na quantidade de sílica correspondente. Além da resistência mecânica, a adição de cinza com alto teor de carbono também influencia a pega (COOK, 1986).

No caso de CBC com alto teor de carbono, suas partículas podem não ser inertes, mas a grande quantidade de carbono pode reduzir a capacidade reativa do material.

### **3.7.4. Adição de CBC em cimento**

Segundo BARBOSA et al. (1998), em estudo realizado com cinza de casca de arroz e cinza de bagaço de cana-de-açúcar, os resultados obtidos

apresentam semelhanças quanto ao seu comportamento mecânico, tendo em vista os dois tipos de cinza utilizados. Observa-se que a resistência à compressão das argamassas estudadas é inversamente proporcional ao teor de cinza adicionado. Para os ensaios de absorção as argamassas com maiores teores de cinza, tendem a ser mais permeáveis. Este fato se deve ao crescimento do fator água/cimento com o objetivo de manter a mesma consistência.

Segundo VALENCIANO (1999) os resultados da determinação da resistência à compressão simples dos corpos-de-prova confeccionados com diferentes combinações de cimento Portland/cinzas de bagaço de cana-de-açúcar, aos 7 e 28 dias, apresentaram os maiores valores de resistência alcançados pelas combinações C1 (100% de cimento - 0% de cinzas) e C2 (90% de cimento - 10% de cinzas) e o menor valor pela combinação C6 (50% de cimento - 50% de cinzas). O aumento do teor de cinzas, nas diferentes combinações de cimento-cinzas testadas, provocou decréscimos significativos na resistência à compressão simples dos corpos-de-prova confeccionados com cimento Portland/cinzas de bagaço de cana-de-açúcar a partir da incorporação de 30% de cinzas na mistura, em ambas as idades.

CORDEIRO et al. (2004), realizou estudo do processo de moagem da cinza do bagaço da cana-de-açúcar visando seu emprego como aditivo mineral para concreto onde concluiu que na moagem convencional a redução do tamanho das partículas em função do tempo de moagem é significativa. Entretanto, é necessário 960 min para que alcance um diâmetro médio relativo de 8 $\mu$ m. Observou ainda que o aumento do tempo de moagem de 480 min para 960 min resultou em uma redução pouco significativa no tamanho das partículas. E que a redução do tamanho das partículas e conseqüente aumento da superfície específica resultou no aumento da atividade pozolânica da cinza.

#### **4. MATERIAL E MÉTODOS:**

A presente investigação foi conduzida no Departamento de Engenharia Agrícola da Universidade Federal de Viçosa, cidade de Viçosa/MG, e contou com a colaboração da infra-estrutura dos laboratórios abaixo mencionados:

- Laboratório de Construções Rurais – Departamento de Engenharia Agrícola/UFV;
- Laboratório de Painéis e Energia - Departamento de Engenharia Florestal/UFV;
- Laboratório de Propriedades do Papel - Departamento de Engenharia Florestal/UFV;
- Laboratório de Engenharia Civil - Departamento de Engenharia Civil/UFV;
- Laboratório de Química – Departamento de Química/UFV.
- Laboratório de Química – Universidade Estadual do Norte Fluminense.
- Laboratório de Raio - X – Departamento de Física/UFV.
- Núcleo de valorização de Materiais Minerais – Universidade Federal de Ouro Preto.

O trabalho foi dividido em duas fases. A primeira composta pela obtenção e caracterização da cinza de bagaço de cana (CBC) e a segunda pela sua avaliação como aditivo em pastas e argamassas através de ensaios mecânicos e físicos.

A Figura 03 mostra um diagrama de blocos esquematizando a rota experimental desenvolvida neste trabalho.

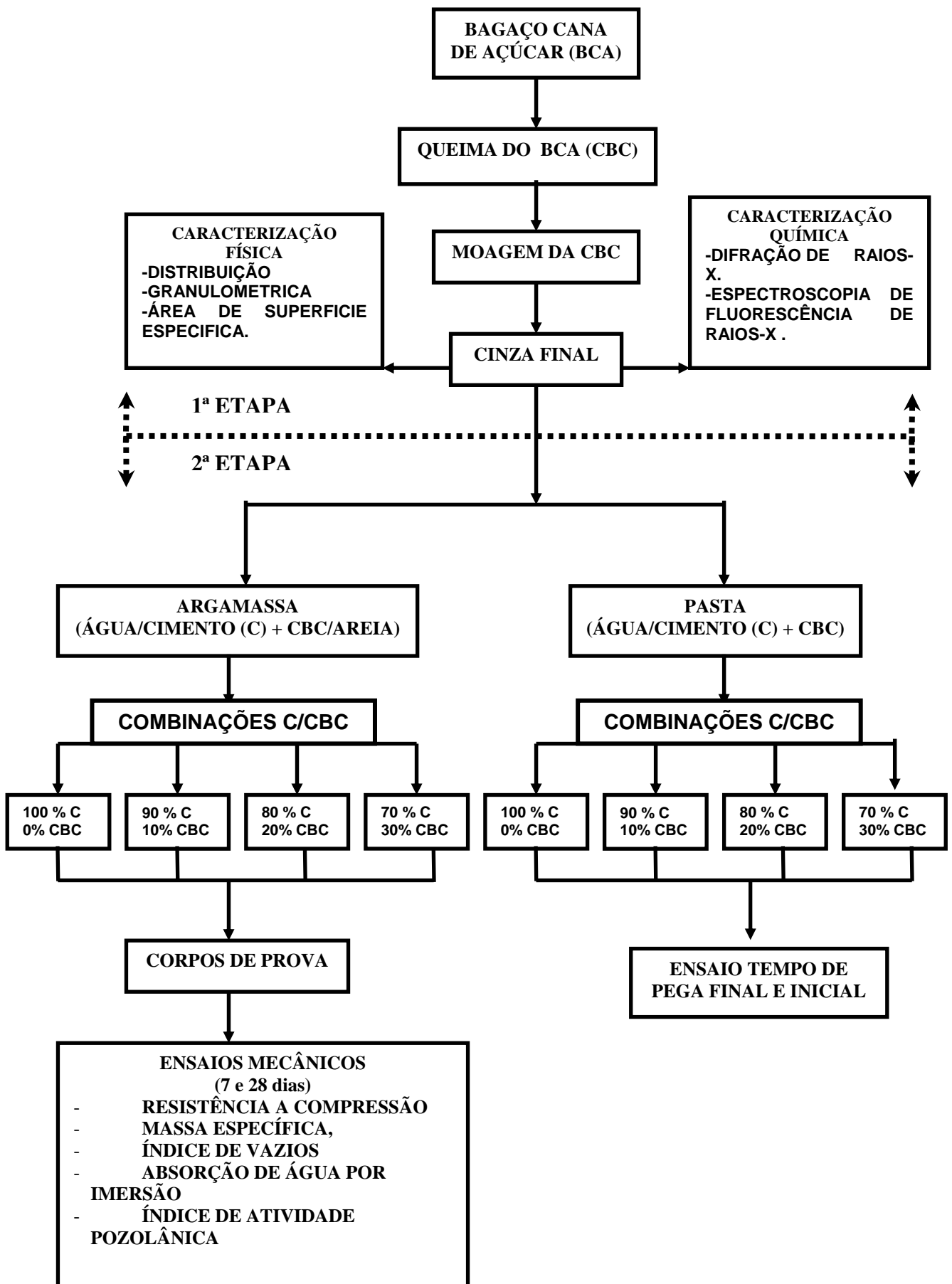


Figura 03. Rota experimental esquemática desenvolvida neste trabalho.

#### 4.1. Caracterização da CBC

A aplicação do bagaço da cana de açúcar como fonte de cinza obedeceu a dois fatores: o rendimento da cinza (em torno de 10%) e a sua constituição química. Além da sílica, a cinza pode conter álcalis e traços de óxido de ferro, alumínio, cálcio e magnésio.

A CBC empregada neste estudo foi obtida do bagaço da cana de açúcar (Figura 4), originária da Usina Jatiboca, localizada no município de Urucânia-MG a 200 km de Belo Horizonte.



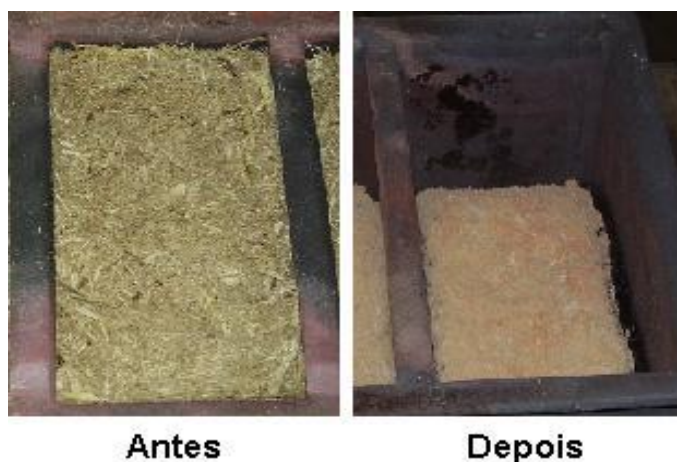
**Figura 04.** Bagaço de cana-de-açúcar gerado na Indústria de Jatiboca: a) acúmulo de cinza no pátio da indústria e b) sítio de disposição nas imediações.

O Bagaço da cana de açúcar foi coletado e levado ao Laboratório de Painéis e Energia da UFV onde foi queimado por 6 horas a 600°C, utilizando-se uma mufla. Além da mufla, foi utilizado um gaseificador que encontra-se na área de Secagem e Armazenamento de Grãos/DEA, cujo objetivo foi acelerar o processo de fabricação da cinza, conforme ilustra Figura 5.



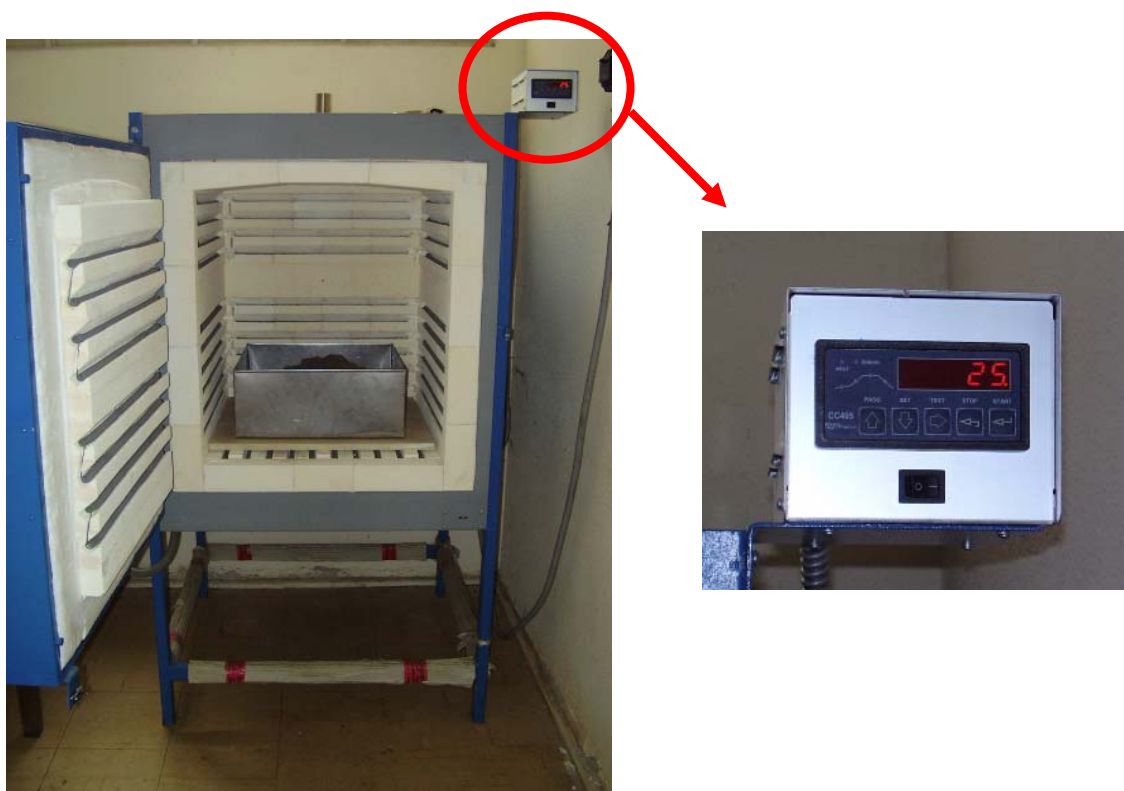
**Figura 05.** Mufla(a) e Gaseificador(b) usado para a queima do bagaço da cana-de-açúcar

Após a queima (Figura 06), pôde-se observar uma camada de cinza de cor clara na superfície e logo abaixo uma cinza com coloração preta e sua composição heterogênea, compreendendo restos de bagaço de cana-de-açúcar não queimados, de diferentes tamanhos, além de partículas de carvão que se desfaziam ao simples toque, sendo necessário a realização de uma nova queima para uma homogeneização da amostra.



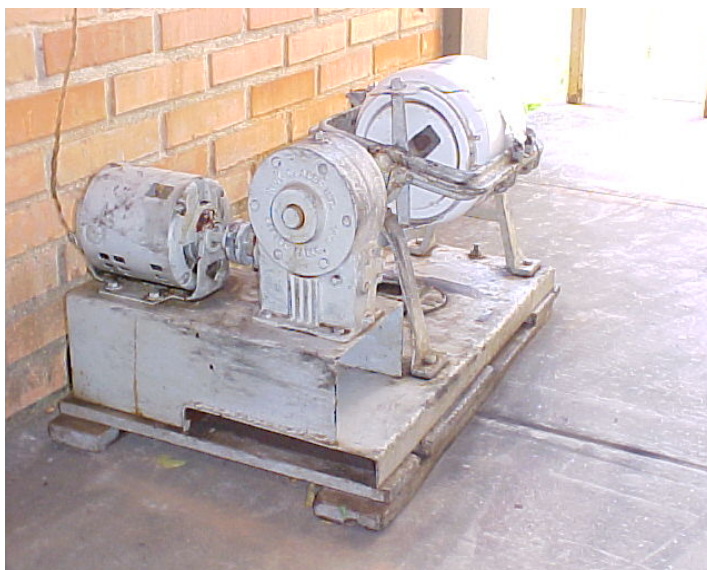
**Figura 06.** Bagaço da cana-de-açúcar antes a após a queima.

A segunda queima da CBC foi realizada no Departamento de Química onde foi incinerada a 700°C por 3 horas, utilizando-se uma mufla da marca Thermo Kiln modelo KK260 SO 1060 com controlador (Figura 07), facilitando assim o controle da temperatura da requeima, cujo objetivo foi homogeneização da amostra, redução considerável na quantidade de carbono e aumento da quantidade de sílica amorfa.



**Figura 07.** Mufla com controlador usada para a requeima do bagaço da cana-de-açúcar.

Após a requeima, a CBC foi resfriada naturalmente e levada ao Departamento de Engenharia Agrícola, na Área de Construções Rurais, onde foi determinado o teor de carbono da cinza e realizada a moagem através de um moinho de bolas (Figura 08), uma vez que o material original se apresentava de forma grosseira, imprópria para o fim proposto. Com esse procedimento pretendeu-se, também, aumentar a quantidade de cinza passível de utilização, pois o processo de moagem aumenta a reatividade da adição, a qual é proporcional a sua superfície específica.



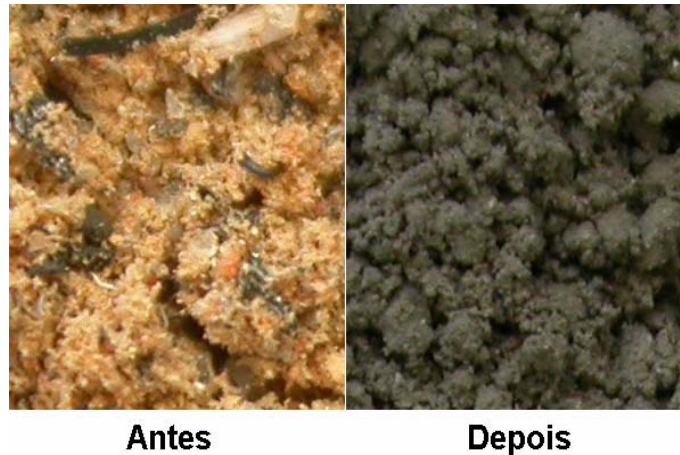
**Figura 08.** Moinho de bola utilizado na moagem da CBC.

O moinho utilizado apresenta carcaça de PVC, cilíndrico, com 19 cm de diâmetro interno e 20 cm de altura (Figura 9), com capacidade de moagem em torno de 1,5 kg/moagem. O moinho gira através de um motor ligado ao moinho por uma correia dentada.



**Figura 09.** Cilindro e esferas utilizadas na moagem da CBC.

Os corpos moedores utilizados foram de aço, com diâmetros de: 1,9cm; 1,8cm; 1,6cm; 1,1cm; 0,9cm e 0,6cm. O tempo estabelecido para moagem da CBC foi de 11 horas. A Figura 10, mostra a cinza antes e após a moagem.



**Figura 10.** Cinza de CBC antes e após a moagem.

Após a moagem, foram coletadas seis amostras da cinza as quais foram levadas a uma estufa, onde foram secas durante 24 horas a 70 °C. O teor de umidade médio das cinzas foi igual a 1,45%.

#### **4.1.1. Caracterização química**

A caracterização química da CBC foi realizada com base nos ensaios de espectroscopia de fluorescência de Raios-X e difração de Raios-X.

##### **4.1.1.1. Espectroscopia de fluorescência de Raios-X**

A obtenção da composição do bagaço da cana de açúcar foi avaliada no Laboratório do Departamento de Química da Universidade Estadual do Norte Fluminense, por meio de análises por fluorescência de raios-X. Esta técnica é adequada para análise de elementos maiores e menores, metálicos ou não metálicos, em amostras sólidas e líquidas. É sensível à grande parte dos elementos da Tabela Periódica, do Sódio ao Urânio. As vantagens principais são: alta velocidade analítica, alta resolução gráfica, sendo um método não-destrutivo, multielementar e simultâneo.

Para o ensaio acima mencionado foi utilizado o equipamento EDX-700 da marca Shimadzu equipado com tubo de Raios X de Rh. As condições de operação do equipamento selecionado foram: tensão do tubo – 50 kV, corrente no tubo – 500  $\mu$ A, colimador – 10 mm, tempo real de integração – 300 s, tempo morto do detector – 1%, sob vácuo.

#### **4.1.1.2. Difração de Raios-X**

O ensaio de difração Raios-X é uma técnica que responde à cristalinidade da substância permitindo identificação de materiais quanto às suas características cristalinas e a quantificação de elementos de constituição desde que em faixa adequada de concentração. O ensaio foi realizado no Laboratório de Raios-X do Departamento de Física da Universidade Federal de Viçosa.

Esta técnica funciona da seguinte maneira: um feixe de raios incide sobre uma molécula e, ao encontrar um dos átomos dessa molécula, faz os seus elétrons oscilar, com isso, todos os elétrons geram mais raios X e do outro lado da molécula saem diversos feixes de raio. Isso é a difração. A análise desse chuveiro permite achar a posição de cada átomo e determinar a estrutura da molécula.

#### **4.1.2. Caracterização física**

Distribuição granulométrica e área de superfície específica são dois parâmetros físicos que complementam a caracterização química da CBC, possibilitando compreender de que maneira a cinza interage com o cimento durante a hidratação, modificando suas propriedades após endurecimento.

Para a realização destes ensaios, foram coletadas 9 amostras em tempos diferentes de moagem (0; 30; 60; 120; 180; 300; 420; 540; 660 min).

##### **4.1.2.1. Distribuição granulométrica**

As análises físicas foram realizadas no Laboratório de Propriedades do Papel do Departamento de Engenharia Florestal/UFV, onde foram realizados os ensaios de granulometria por difração a laser.

O ensaio de granulometria por difração a laser vem sendo utilizado devido sua facilidade de operação, rapidez de análise e ampla faixa de tamanhos, para caracterizar distribuições de tamanho de partículas, dispersas em meio líquido ou em forma de pó seco. A difração a laser baseia-se no princípio (difração Fraunhöffer) de que, quanto menor o tamanho da partícula,

maior o ângulo de difração de um feixe luminoso que atravessa uma população de partículas.

#### 4.1.2.2. Área de superfície específica

A área de superfície específica expressa, para uma dada quantidade de material, a área total superficial de suas partículas. Quanto maior a área de superfície específica, maior o contato entre as partículas da CBC com o cimento. Portanto maior a reatividade. Há vários métodos para a sua determinação (Blaine, Absorção de  $N_2$ (SBET), Absorção éter, etc.). No experimento foi utilizado o método de análise elementar de nitrogênio e da área de superfície específica (SBET).

A análise da área de superfície específica das cinzas foi realizada no Núcleo de Valorização de Materiais Mineraiis na Universidade Federal de Ouro Preto.

#### 4.1.3. Pasta de cimento com adição de CBC

Durante esta fase do trabalho foi utilizado o cimento do tipo CPV ARI PLUS (Cimento Portland de Alta Resistência Inicial), fornecido pela Fábrica de Cimento Barroso, localizada no município de Barroso, MG, cujas propriedades químicas, fornecidas pelo fabricante, são apresentadas nas Tabelas 3.

**Tabela 3.** Composição química do cimento CPV ARI PLUS.

Composição Química		Método de análise	Teor em Massa(%)
<b>Anidrito carbônico</b>	CO <sub>2</sub>	NBR 11583	1,14
<b>Perda ao fogo</b>	PF 500 ° C	NBR 5743	0,75
	PF 1000 °C	NBR 5744	2,99
<b>Resíduo insolúvel</b>	R.Insol.	NBR 5744	0,53
<b>Anidrito sulfúrico</b>	SO <sub>3</sub>	NBR 5745	2,74
<b>Dióxido de silício</b>	SiO <sub>2</sub>	NBR 9203	19,23
<b>Dióxido de alumínio</b>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	NBR 9203	5,14
<b>Oxido de ferro</b>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	NBR 9203	2,78
<b>Óxido de cálcio total</b>	CaO	NBR 9203	64,37
<b>Oxido de magnésio</b>	MgO	NBR 9203	0,78
<b>Oxido de potássio</b>	K <sub>2</sub> O		0,74
	Cor L	NBR 5747	2,66
	C <sub>3</sub> A (teórico)		7,91

**Fonte:** Holcim/Fábrica Barroso

#### **4.1.3.1. Escolha das combinações de cimento-cinza**

A escolha das combinações de cimento Portland e cinza de bagaço de cana-de-açúcar que melhor resultado apresentasse, foi feita com base nos trabalhos desenvolvido por BARBOSA et al. (1998) e CORDEIRO et al. (2004), onde optou-se por trabalhar com as seguintes combinações em massa a saber: 100-0(C1), 90-10(C2), 80-20(C3), 70-30(C4) (% de cimento - % de cinza). Para estas combinações, com base no índice de consistência normal, foi adotada a relação água/cimento igual a 0,32 segundo NBR 11580 (1991) da ABNT.

#### **4.1.3.2. Tempo de pega inicial e final**

Para o ensaio de tempo de pega inicial e final, foram utilizados corpos de provas com altura de 40 mm, diâmetro interno superior de 70 mm e inferior de 80mm. O ensaio foi realizado de acordo com a NBR 11581 (1991) da ABNT.

Para a realização do ensaio, utilizou-se o aparelho de Vicat (Figura 11), que consiste de um suporte que sustenta uma haste móvel que pesa 300 g e um indicador de penetração, que se desloca ao longo de uma escala graduada em milímetros.

Numa das extremidades desta haste coloca-se uma agulha de 50 mm de comprimento.

As leituras foram realizadas fazendo-se a agulha de Vicat descer sobre a pasta. O início da pega é constatado no momento em que a agulha de Vicat, descendo sobre a pasta de consistência normal, estaciona a 10 mm da placa de vidro. O tempo de início de pega é o intervalo decorrido entre o instante em que se lançou a água à pasta e o instante em que se constata o início da pega.

Após a constatação do início da pega, faz-se leituras a intervalos regulares de 10 min. O fim da pega é constatado quando a agulha praticamente não mais penetra no corpo de prova (leitura em 38 mm). O Tempo de fim de pega é o intervalo decorrido entre o instante em que se lançou a água de amassamento à pasta e o instante em que se constatou o fim da pega.

Este ensaio foi realizado no Laboratório de Construções Rurais – DEA/UFV.



**Figura 11.** Aparelho de Vicat usado para realização do ensaio de tempo de pega inicial e final.

#### **4.1.4. Caracterização mecânica**

##### **4.1.4.1. Argamassa de cimento com adição de CBC**

Nesta fase do trabalho, além do cimento CPV ARI PLUS (Cimento Portland de Alta Resistência Inicial) da marca Barroso, foi utilizada a Areia Normal Brasileira, cuja produção é normalizada pela NBR 7214 (1982) da ABNT. A areia em questão foi fornecida pelo IPT (Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo) em frações individuais: 1,2 mm (peneiras 16); 0,6 mm (peneira 30); 0,3 mm (peneira 50); e 0,15 mm (peneira 100).

Para avaliar a influência da adição de CBC na argamassa no estado endurecido foram realizados ensaios de resistência à compressão, determinação da massa específica, absorção de água por imersão e índice de vazios.

#### 4.1.4.2. Moldagem dos corpos de prova

Para os ensaios de resistência à compressão, determinação da massa específica, absorção de água por imersão e índice de vazios foram moldados corpos-de-prova com 5 cm de diâmetro e 10 cm de altura seguindo os procedimentos indicados pela norma NBR 7215 (1991) da ABNT, no Laboratório de Engenharia Civil/UFV.

Foram preparados corpos-de-prova com traço 1:3 (cimento: areia) e com relação  $a/c = 0,48$ . As diferentes combinações de cimento-cinza, a saber: C1 (100-0), C2 (90-10), C3 (80-20), C4 (70-30) [% de cimento - % de cinza, em massa], utilizando-se um misturador mecânico para preparar as amostras (Figura 12).



**Figura 12.** Moldagem dos corpos-de-prova.

Para cada combinação de cimento-cinza foram moldados 18 corpos-de-prova, sendo: 6 destinados aos ensaios de resistência à compressão simples ao 7 e 28 dias; 4 aos ensaios de massa específica, 4 aos ensaios de absorção de água por imersão e 4 aos ensaios de índices de vazio ambos realizados aos 28 dias.

O processo de adensamento (Figura 13 - a) foi feito com soquete normal. Após a moldagem, foi colocado na face superior dos corpos-de-prova uma placa de vidro plano (Figura 13 - b), logo após os corpos de prova foram colocados em câmara úmida por aproximadamente vinte e quatro horas.



**Figura 13.** Adensamento(a) e Armazenamento(b) do corpo-de-prova.

Terminado o período inicial de cura (24 horas), os corpos de prova foram retirados das fôrmas, identificados e mergulhados em um tanque de água saturada de cal (Figura 14), onde permaneceram até o momento do ensaio.



**Figura 14.** Corpos-de-prova submetidos à cura com cal.

Os corpos-de-prova com as 4 combinações de cimento-cinza estão mostrados na Figura 15.



**Figura 15.** Corpos-de-prova com combinações C1, C2, C3, C4 de cimento-cinza de CBC.

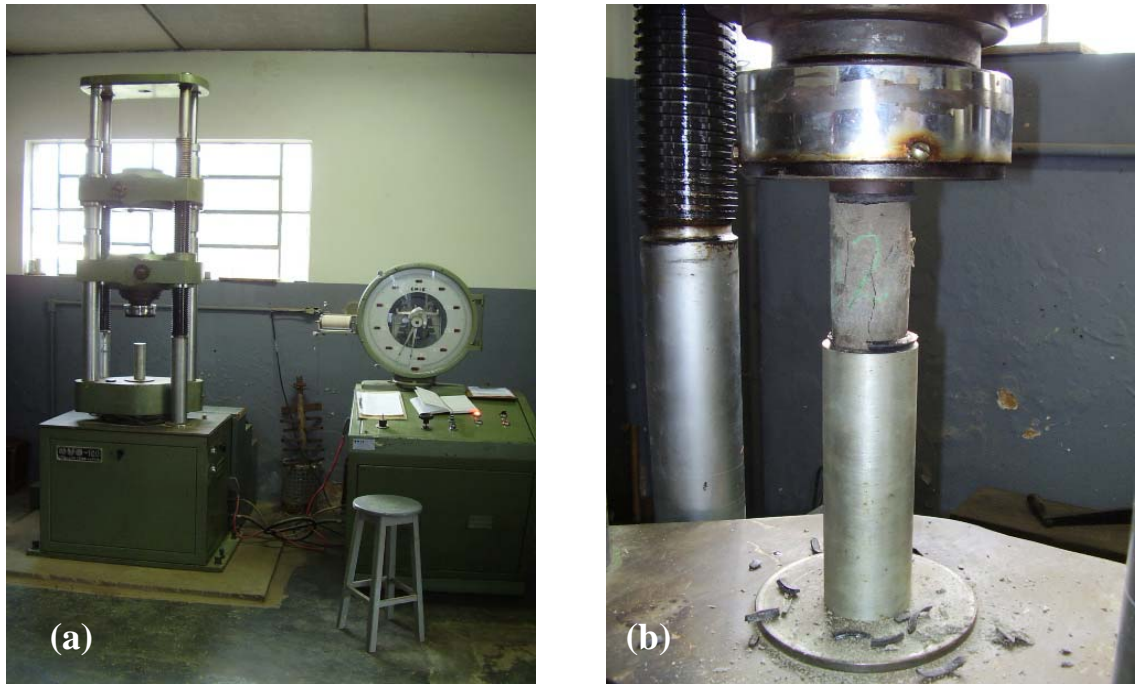
#### 4.1.4.3. Determinação da resistência à compressão

A determinação da resistência à compressão simples foi feita de acordo com a norma NBR 7215 (1991) da ABNT.

Os corpos-de-prova, depois de capeados (Figura 16) com a mistura de enxofre e caulim à quente, foram rompidos aos 7 e 28 dias de idade, em máquina de ensaio (Figura 17).



**Figura 16.** Capeamento dos corpos-de-prova.



**Figura 17.** Ensaio de Resistência a Compressão: (a) maquina Universal; (b) rompimento do corpo-de-prova.

A resistência à compressão simples foi calculada individualmente para cada corpo-de-prova, dividindo-se a carga de ruptura pela área da seção transversal do corpo-de-prova. A resistência foi determinada pela média aritmética das resistências individuais de 3 corpos-de-prova, ensaiados na mesma idade.

#### **4.1.4.4. Determinação do índice de atividade pozolânica**

A atividade pozolânica da cinza foi avaliada através da determinação do índice de atividade pozolânica com cimento portland (IAP), conforme NBR 5752 (1952) da ABNT. O índice de atividade pozolânica é definido como:

$$IAP = \frac{f_{cp}}{f_{cc}} \times 100 \quad \text{eq. 01}$$

Onde:

- $f_{cp}$ : resistência à compressão média, aos 28 dias, dos corpos-de-prova moldados com cimento portland e cinza (material pozolânico);
- $f_{cc}$ : resistência à compressão média, aos 28 dias, dos corpos-de-prova moldados somente com cimento portland ;

#### 4.1.4.5. Determinação da absorção de água por imersão (Absorção), índice de vazios (porosidade) e massa específica (densidade)

Os ensaios de absorção de água por imersão, índice de vazios e massa específica dos corpos-de-prova de argamassa foram realizados com base na NBR 9778 (1987) da ABNT conforme Figura 18.

Estes ensaios compõem os parâmetros para uma análise inicial dos efeitos das diferentes constituições, procedimentos de cura e condições de envelhecimento dos compósitos.



**Figura 18.** Ensaio de absorção de água por imersão, índice de vazios e massa específica.

No ensaio de absorção por imersão mede-se o volume de poros na argamassa, e não a facilidade com que um fluido pode penetrar. Entretanto, a determinação do volume dos poros da argamassa, é importante para o entendimento do seu comportamento quanto às propriedades mecânicas e de durabilidade.

A massa específica é definida como sendo a relação entre a massa do sólido e o volume que ele ocupa, incluindo os poros impermeáveis. A massa específica da argamassa está diretamente relacionada à massa específica de cada um dos seus componentes e suas proporções na mistura.

Os índices físicos são definidos conforme as equações abaixo:

$$\text{Densidade} = \frac{M_{\text{sec}}}{(M_{\text{sat}} - M_{\text{sub}})} \quad \text{eq.02}$$

$$\text{Absorção} = \frac{M_{\text{sat}} - M_{\text{sec}}}{M_{\text{sec}}} \quad \text{eq.03}$$

$$\text{Porosidade} = \frac{M_{\text{sat}} - M_{\text{sec}}}{(M_{\text{sec}} - M_{\text{sub}})} \quad \text{eq.04}$$

Em que:

- $M_{\text{sec}}$  é a massa do corpo-de-prova seco em estufa a 100° C por 24 h;
- $M_{\text{sat}}$  é a massa do corpo-de-prova, tendo sido mantido imerso em água por 28 dias;
- $M_{\text{sub}}$  é a massa submersa, determinada com o corpo-de-prova saturado sendo pesado em imersão.

#### 4.2. Delineamento experimental

O experimento foi desenvolvido em delineamento experimental inteiramente casualizado (DIC), constituindo por 4 tratamentos, sendo: 3 níveis de adição de cinza de bagaço de cana-de-açúcar (CBC) e um testemunho (100% cimento), com 3 repetições.

Os melhores níveis de adição de CBC foram estimados utilizando o procedimento para análise de variância, às médias encontradas foi aplicado o teste de médias Tukey para todas as combinações aos 7 e 28 dias.

## 5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

### 5.1. Caracterização química

#### 5.1.1. Composição química

Na Tabela 4 apresenta-se a composição química da CBC. Neste caso, a cinza apresenta baixo teor de carbono, 5%, e em decorrência disso possui cor cinza clara. Segundo COOK (1986), em materiais à base de cimento com incorporação de cinza, a presença de até cerca de 20% de carbono na cinza não afeta significativamente a resistência à compressão.

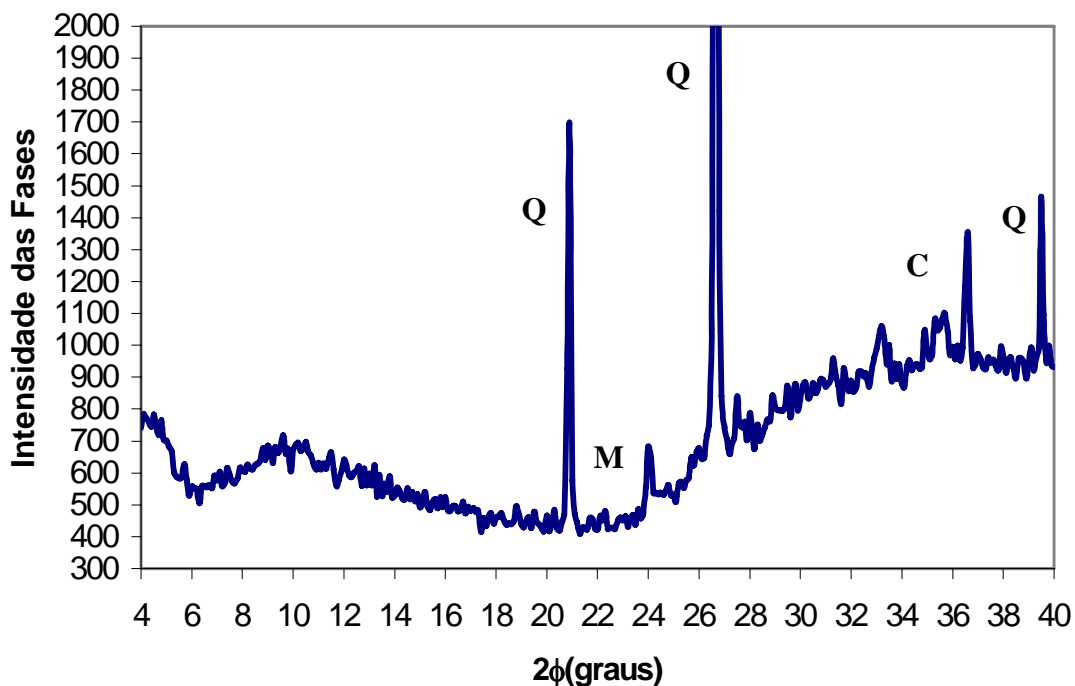
**Tabela 4.** Composição química da CBC realizada por espectroscopia de fluorescência de raios X.

<b>Composto químico</b>	<b>Composição (%)</b>
SiO <sub>2</sub>	83,707
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	6,537
K <sub>2</sub> O	6,146
CaO	1,183
TiO <sub>2</sub>	1,162
SO <sub>3</sub>	0,682
ZrO <sub>2</sub>	0,303
Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,094
MnO	0,081
Sc <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,040
ZnO	0,037
V <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0,029

De acordo com a Tabela 4, observa-se que a composição química da CBC assemelha-se àquelas relatadas por FREITAS (1998) e CORDEIRO (2004), com teor de sílica de cerca de 80%.

### 5.1.2. Difração de Raios-X

O espectro de difração da CBC é mostrado na Figura 19, onde a intensidade das fases, em contagens por segundo (CPS) é dada em função do ângulo de difração,  $2\theta$ .



**Figura 19.** Análise de difração de Raio-X da CBC.

Analisando a Figura 19, observa-se um halo entre  $2\theta=06$  e  $18^\circ$  e entre  $24$  a  $40^\circ$ , que caracteriza a fase amorfa. Os picos ( $2\theta=21^\circ$  e  $2\theta=27^\circ$ ) indicam que a estrutura da CBC apresenta as fases cristalinas da sílica, cristobalita (C) e quartzo (Q), além de cristais de muscovita (M).

A presença de  $\text{SiO}_2$  na fase de quartzo, pode ter ocorrido devida aos seguintes fatores: a) ocorrência de contaminação do bagaço por areia, uma vez que este é despejado no pátio da indústria. Neste caso, a presença de quartzo pode ser evitada com a lavagem do bagaço; b) decorrência do processo de queima, os parâmetros podem ser adequados (de forma empírica) de modo a obter uma cinza predominantemente amorfa (RODRIGUES, 2004).

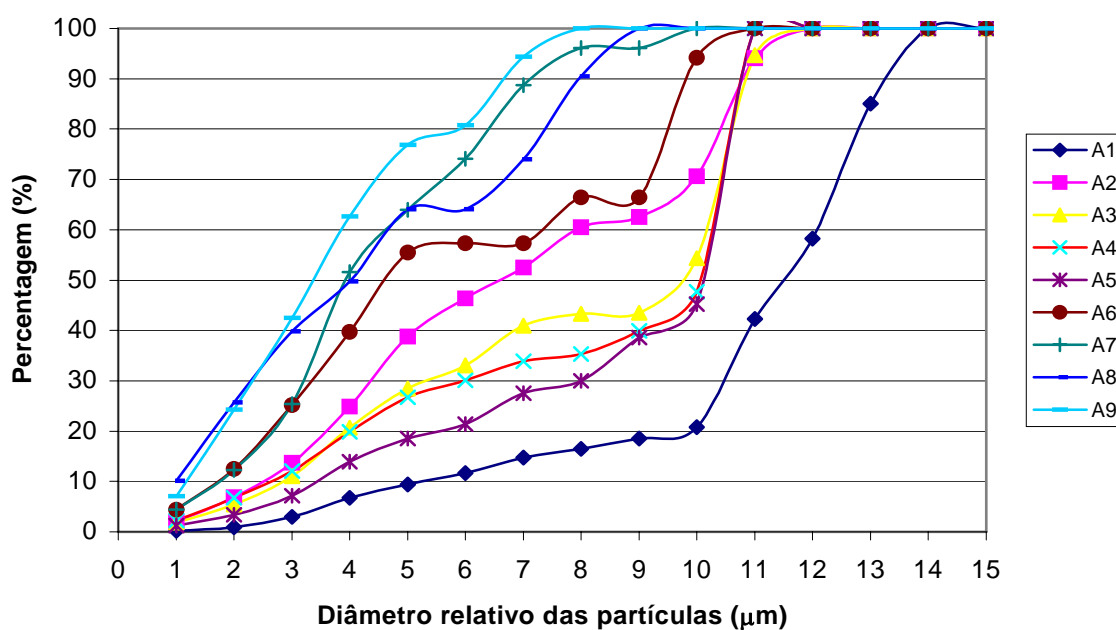
## 5.2. Caracterização Física

### 5.2.1. Composição Granulométrica

Para a realização deste ensaio, foram coletadas 9 amostras, conforme a Tabela 5. A Figura 20 apresenta as curvas granulométricas para a moagem com corpos moedores de aço durante 11 horas. Os diferentes períodos de moagem foram testados a fim de se determinar um bom grau de finura em um menor período de tempo de funcionamento do moinho de bolas.

**Tabela 5.** Amostras de CBC com seus respectivo tempo de moagem.

Amostra	Tempo de Moagem (min)
A1	0
A2	30
A3	60
A4	120
A5	180
A6	300
A7	420
A8	540
A9	660

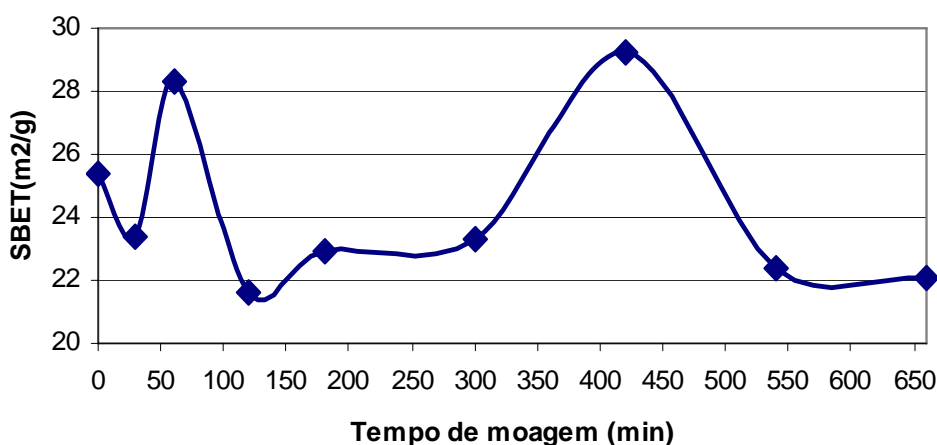


**Figura 20.** Distribuição granulométrica das amostras de CBC com diferentes tempos de moagem em moinho de bola.

Observa-se na Figura 20 que o tamanho médio dos grãos diminui pouco com o aumento no tempo de moagem. Nota-se que, de um modo geral, as amostras de CBC são compostas por partículas com tamanhos entre 1 e 14  $\mu\text{m}$ , com os tamanhos médios nos diferentes períodos de moagem variando de cerca de 3  $\mu\text{m}$  a cerca de 12  $\mu\text{m}$ .

### 5.2.2. Superfície Específica

Para a realização deste ensaio, foram coletadas 9 amostras. A Figura 21 apresenta a curva do tempo de moagem *versus* Superfície Específica para a CBC durante 11 horas.



**Figura 21.** Comportamento da superfície específica (SBET) para a CBC em função do tempo de moagem.

Para os resultados encontrados, observa-se que o valores de superfície específica oscilaram numa faixa relativamente estreita, mantendo-se constante, da ordem de 24  $\text{m}^2/\text{g}$ , para os diferentes períodos de moagem. Mostrando que foi pouco significativa o tempo de moagem realizada.

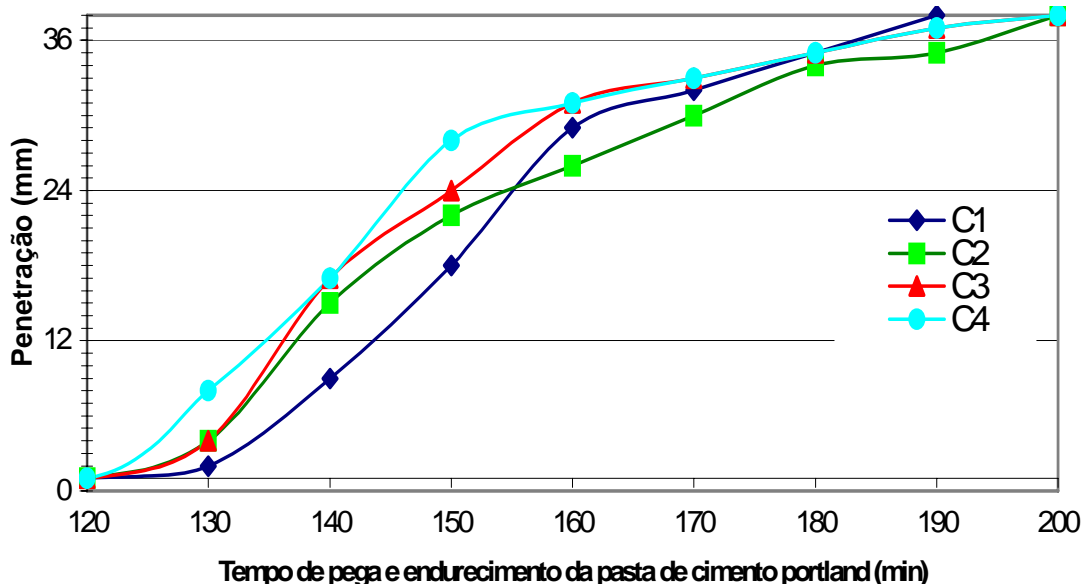
Esta oscilação dos valores de superfície específica também foi observada por BUI (2001) em experimento realizado com cinza de casca de arroz. Segundo o autor, o aumento no tempo de moagem pode diminuir a área de superfície específica. Isto se deve ao grande volume de microporos e irregularidades que fazem com que a cinza apresente alto valor de área de superfície específica. A moagem da cinza pode provocar a quebra desta rede

de microporos diminuindo a área de superfície específica, mesmo com o decréscimo do tamanho da partícula.

### 5.3. Pasta de Cimento com adição de CBC

#### 5.3.1. Tempo de pega inicial e final

As reações entre cimento e água são as causas básicas da pega do material à base de cimento. O objetivo deste ensaio foi avaliar a influência da adição de CBC nos tempos de pega inicial e final. A Figura 22 contém as curvas dos tempos de pega da pasta de cimento sem adição de CBC e com as dosagens de 0%, 10%, 20% e 30% de adição de CBC , em massa de cimento.



**Figura 22.** Diagrama de Pega e Endurecimento da Pasta de Cimento com adições de CBC.

Com base no gráfico, observa-se que a adição de CBC não alterou significativamente a forma da curva característica do tempo de pega. As adições de 10%, 20% e 30% de CBC não causaram adiantamento e nem retardo do início da pega, o que era de se esperar, uma vez que a reação pozolânica ocorre num estágio mais adiantado da hidratação do cimento (7 e 15 dias após a mistura). Assim, o tempo de pega não detectaria influência da atividade pozolânica. O que observamos é que o material não interfere na pega (o que poderia ocorrer em um material com alto teor de carbono).

As adições de 10%, 20% e 30% de CBC acarretaram um retardo de 10 min no intervalo de tempo entre os tempos de pega. Este retardo deve-se a redução do teor de cimento nas combinações.

Na Tabela 06 são apresentadas as relações entre os intervalos de tempos de pega.

**Tabela 06.** Tempos de pega de corpos de prova. Relação água/cimento = 0,32. Cimento CPV Ari Plus.

<b>Dosagem de CBC</b>	<b>C1</b>	<b>C2</b>	<b>C3</b>	<b>C4</b>
<b>Tempo de Início de Pega (min)</b>	120	120	120	120
<b>Tempo de Fim de Pega (min)</b>	190	200	200	200
<b>Intervalo entre Início e Fim de Pega (min)</b>	70	80	80	80
<b>Adiantamento no tempo de Início da Pega (min)</b>	0	0	0	0
<b>Retardamento no tempo de Início da Pega (min)</b>	0	0	0	0
<b>Adiantamento no tempo de Fim da Pega (min)</b>	0	0	0	0
<b>Retardamento no tempo de Fim da Pega (min)</b>	0	10	10	10
<b>Aumento no Intervalo entre o início e Fim da Pega (min)</b>	0	10	10	10

#### **5.4. Ensaios Mecânicos**

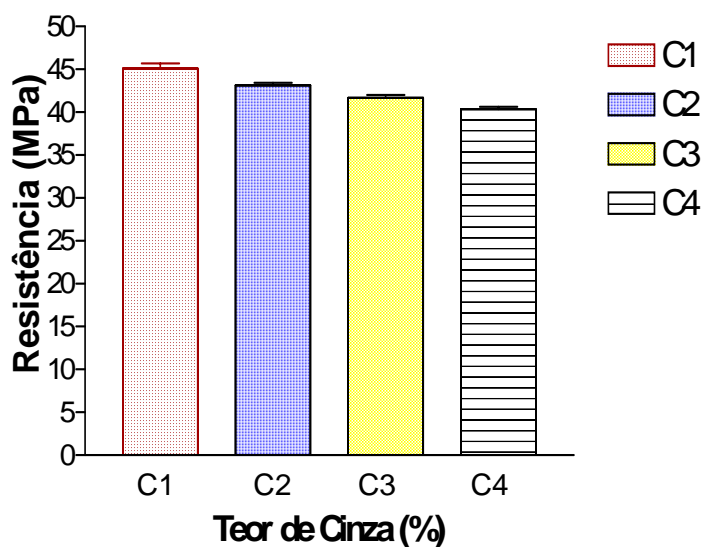
##### **5.4.1. Resistência à Compressão**

Os ensaios de resistência à compressão foram realizados de acordo com a NBR 7215 (Cimento Portland. Determinação da Resistência à Compressão) da ABNT (1991). Foi determinada a resistência nas idades de 7 e 28 dias, sendo rompidos 3 corpos-de-prova para cada idade com as diferentes combinações de cimento-cinza, a saber: C1 (100-0), C2 (90-10), C3 (80-20), C4 (70-30) [% de cimento - % de cinza, em peso]. Notou-se que o acréscimo de CBC nos corpos-de-prova acarretaram em um gradativo escurecimento na coloração dos corpos-de-prova. Os resultados estão mostrados na Tabela 07. Nas Figuras 23 e 24 são mostrados os resultados de resistência à compressão realizados nos corpos-de-prova, em função da interação entre o teor de substituição aos 7 e 28 dias de idade.

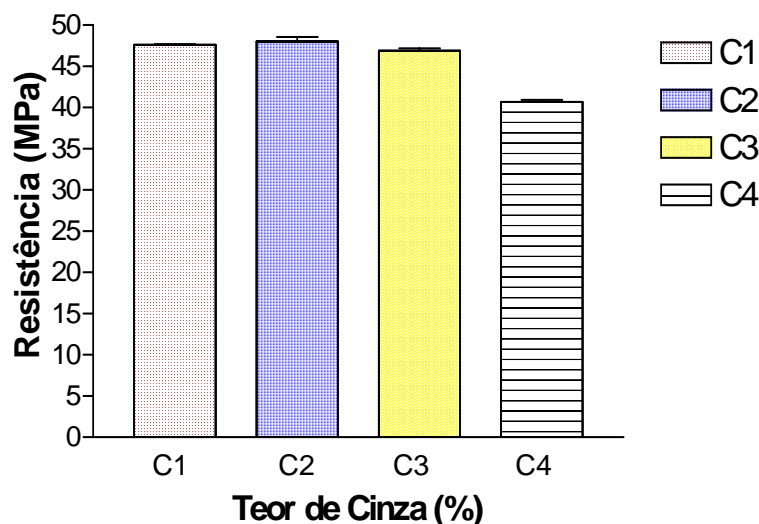
**Tabela 07.** Resultados de resistência à compressão na argamassa aos 7 e 28 dias.

Mistura	a/c	Idade					
		7 dias			28 dias		
		fc	f <sub>cm</sub>	C.V	fc	f <sub>cm</sub>	C.V
C1	0,48	44,4	45,10	1,6	47,7	47,8	0,2
		46,3		2,7	47,4		0,4
		44,6		1,1	48,3		0,2
C2	0,48	43,0	43,13	0,3	47	48,0	2,1
		43,7		1,3	48,4		0,8
		42,7		1,0	48,7		1,5
C3	0,48	41,4	41,70	0,7	47,2	46,9	0,6
		42,3		1,4	46,3		1,3
		41,4		0,7	47,2		0,6
C4	0,48	40,1	40,37	0,7	40,5	40,7	0,5
		40,9		1,3	40,3		1,0
		40,1		0,7	41,2		1,2

fc – Resistência à compressão axial (MPa) f<sub>cm</sub> – Resistência média à compressão axial (MPa)  
C.V. – Coeficiente de variação (%)



**Figura 23.** Resistência à compressão aos 7 dias nas argamassas com diferentes concentrações de cimento e cinza de bagaço de cana-de-açúcar.



**Figura 24.** Resistência à compressão aos 28 dias nas argamassas com diferentes concentrações de cimento e cinza de bagaço de cana-de-açúcar.

Observa-se que, aos 7 dias de idade, o maior valor de resistência alcançado foi pela combinação C1 e o menor valor, pela combinação C4. A seguinte ordem decrescente foi observada para as combinações cimento/cinza: C1 > C2 > C3 > C4 aos 7 dias. Enquanto que aos 28 dias de idade, o maior valor de resistência alcançado foi pela combinação C2 e o menor valor, pela combinação C4. A seguinte ordem decrescente foi observada para as combinações cimento/cinza: C2 > C1 > C3 > C4 aos 28 dias.

Por meio da análise de variância, foi verificado se existe influência do teor de substituição do cimento por CBC, nos resultados de resistência à compressão da argamassa para os valores individuais. Na Tabela 08 é apresentada a análise da influência dos fatores.

**Tabela 08.** Resultados da análise de variância da resistência à compressão aos 7 e 28 dias na argamassa

Fator	G.L	QM	
		f <sub>c7</sub>	f <sub>c28</sub>
Tratamento	3	12,33*	35,79*
Resíduo	8	0,46	0,34
Total	11		

G.L - Graus de Liberdade

\* significativo ao nível de 5% de probabilidade.

QM - Quadrado Médio

A análise de variância aplicada aos dados de resistência à compressão mostrou, ao nível de 5% de probabilidade estatística, alto grau de significância para combinações aos 7 e 28 dias. Aplicado aos dados de resistência à compressão aos 7 e 28 dias na argamassa de cimento com adição de CBC, o teste de Tukey mostrou que aos 7 dias de idade, independentemente da adição de CBC considerada, o tratamento C1 apresentou-se estatisticamente diferente em relação aos demais, as combinações C2 e C3 não foram diferentes entre si, assim como as combinações C3 e C4, conforme apresentado na Tabela 9. Observa-se que a resistência à compressão das argamassas aos 7 dias é inversamente proporcional ao teor de cinza adicionado.

Considerada aos 28 dias, a análise estatística mostrou que os maiores valores de resistência foram alcançados pelas combinações C2, C1 e C3, estatisticamente iguais entre si, conforme apresentado na Tabela 9. Este emparelhamento da resistência aos 28 dias, comprova que a reação pozolânica tem início entre 7 e 15 dias após a mistura, quando a hidratação do cimento se apresenta já em estado avançado conforme observado por RODRIGUES (2004).

**Tabela 9.** Valores médios da resistência à compressão( $f_{cm}$ ) aos 07 e 28 dias de idade na argamassa sem CBC e com adição de CBC no níveis de 10,20 e 30% (C2, C3, C4 respectivamente).

	Mistura			
	C1	C2	C3	C4
$f_{c7}$	45,10a	43,13b	41,7bc	40,37c
$f_{c28}$	48,0a	47,8a	46,9a	40,7b

\* as médias seguidas de pelo menos uma mesma letra, não diferem entre si, ao nível de 5% de probabilidade pelo teste Tukey.

O aumento do teor de cinzas, nas diferentes misturas de cimento-cinzas testadas, provocou decréscimos significativos na resistência à compressão dos corpos-de-prova confeccionados com cimento Portland/cinzas de bagaço de cana-de-açúcar com incorporação de 30% de cinzas na mistura, aos 28 dias. Tais resultados indicam a possibilidade de substituir até 20% do cimento Portland por cinzas de bagaço de cana-de-açúcar, sem prejuízo da resistência à compressão. Ao se comparar os valores encontrados para a resistência a

compressão, nota-se que o aumento da resistência aos 28 dias foi baixo em relação aos 7 dias, fato esse justificado por estar trabalhando com o cimento portland de alta resistência inicial (CPV-ARI), que tem a peculiaridade de atingir altas resistências já nos primeiros dias da aplicação.

#### 5.4.1.1. Índice de atividade pozolânica (IAP)

Os resultados apresentados na Tabela 10 indicam que os índices de atividade pozolânica obtidos respectivamente para cada combinação são valores superiores ao valor mínimo de 75% estabelecido pela NBR 5752 (1992), logo, o material pode ser classificado como pozolana.

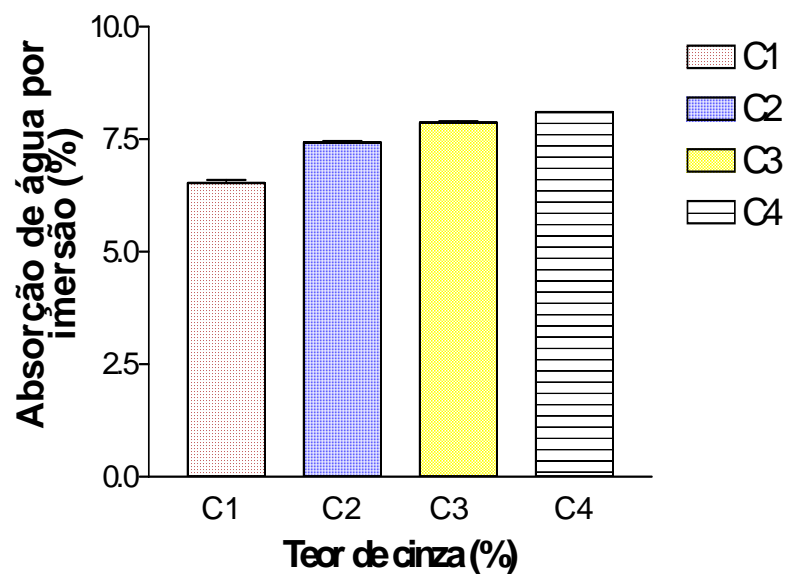
**Tabela 10.** Resistência média à compressão em Mpa da argamassa aos 28 dias e respectivos índices de atividade pozolânica (IAP) para as diferentes misturas de cimento e cinza de bagaço de cana-de-açúcar.

<b>Mistura</b>	<b>Resistência média* (MPa) aos 28 dias</b>	<b>Atividade Pozolânica(%)</b>
<b>C1</b>	47,8	100
<b>C2</b>	48,0	100
<b>C3</b>	46,9	99
<b>C4</b>	40,7	86

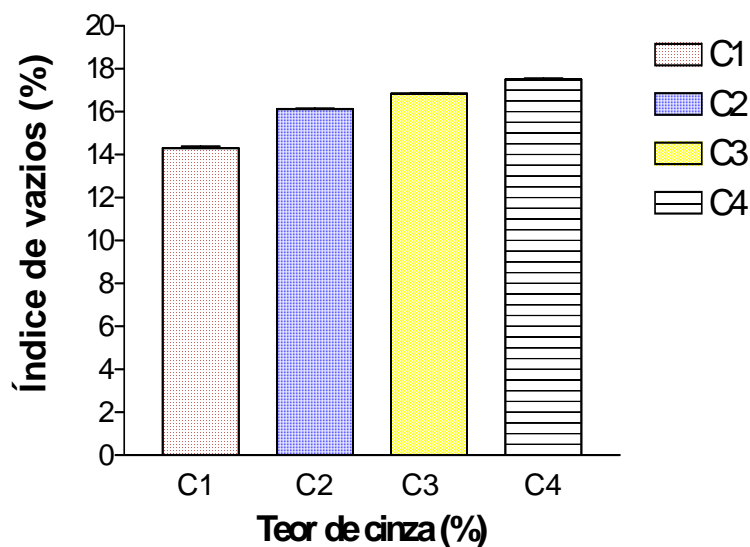
\*Média de 3 corpos de prova

#### 5.4.1.2. Determinação da absorção de água por imersão (absorção), índice de vazios (porosidade) e massa específica (densidade).

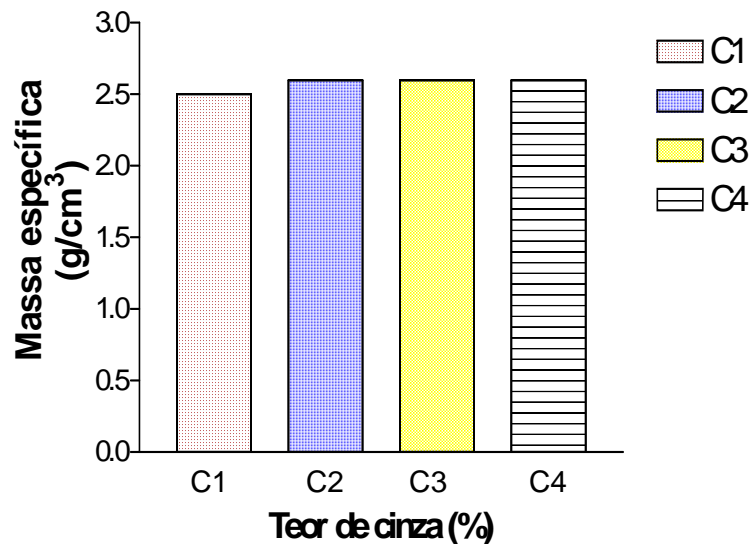
Os ensaios de absorção de água por imersão, índice de vazios e massa específica dos corpos-de-prova de argamassa foram realizados com base na NBR 9778 (Argamassa e concreto endurecidos – Determinação da absorção de água por imersão, índice de vazios e massa específica) da ABNT (1987). Na Figura 25, 26 e 27 são apresentados os resultados, em função do teor de substituição aos 28 dias de idade.



**Figura 25.** Absorção de água por imersão aos 28 dias nas argamassas confeccionadas com diferentes concentrações de cimento e bagaço de cana-de-açúcar.



**Figura 26.** Índice de Vazios aos 28 dias nas argamassas confeccionadas com diferentes concentrações de cimento e bagaço de cana-de-açúcar.



**Figura 27.** Massa específica aos 28 dias nas argamassas confeccionadas com diferentes concentrações de cimento e bagaço de cana-de-açúcar.

Os ensaios resultaram gráficos que relacionam o teor de cinza adicionado nas argamassas em percentual com os respectivos índices. Observa-se, que tanto para a Absorção de água por imersão quanto para o índice de vazios, os gráficos resultaram numa função crescente, donde conclui-se que as argamassas com maiores teores de cinza tendem a ser mais porosas, o que justifica os maiores valores de absorção. Segundo BARBOSA (1998), este fato pode ser resolvido controlando-se o fator água/cimento de cada combinação estudada.

Com relação à massa específica, observou-se que houve um pequeno aumento com a adição de CBC (0,5%). O que se pode depreender dessa análise é que a substituição parcial do cimento Portland por até 30% de cinzas na mistura não provocou qualquer modificação significativa nos valores da massa específica.

Através da análise de variância, foi verificado se existe influência do teor de substituição do Cimento por CBC, nos resultados de Absorção de água por imersão, índice de vazios e massa específica da argamassa para os valores individuais. Na Tabela 11 e 12 são apresentadas as análises da influência dos fatores.

**Tabela 11.** Resultados da análise de variância da Absorção de água por imersão, índice de vazios e massa específica aos 28 dias na argamassa (Abs<sub>H2O,28</sub>, IV<sub>28</sub>, M<sub>esp,28</sub>, respectivamente).

Fator	G.L	QM		
		Abs <sub>H2O,28</sub>	IV <sub>28</sub>	M <sub>esp,28</sub>
Tratamento	3	1,43*	5,748*	0,075 <sup>NS</sup>
Resíduo	8	0,005	0,0125	0
Total	11			

G.L - Graus de Liberdade

QM - Quadrado Médio

\* significativo ao nível de 5% de probabilidade.

Com base nas análise de variância apresentada na Tabela 11, pode-se observar que houve influência significativa do teor de adição de CBC nos resultados de absorção de água por imersão e índice de vazios. A análise de variância mostra que não houve influência significativa do teor de adição de CBC nos resultados de massa específica.

Aplicado aos dados de absorção de água por imersão e índice de vazios aos 28 dias na argamassa de cimento com adição de CBC, o teste de Tukey mostrou que, conforme Tabela 12, que não houve interação entre as combinações estudadas.

**Tabela 12.** Valores médios da absorção de água, índice de vazios e massa específica aos 28 dias de idade na argamassa sem e com adição de CBC.

Parâmetros		Combinações			
		C1	C2	C3	C4
Absorção de água (%)	Média	6,6a	7,5b	7,8c	8,0d
Índice de Vazios (%)	Média	14,4a	16,3b	16,8c	17,3d

as médias, nas linhas, seguidas de pelo menos uma mesma letra, não diferem entre si, ao nível de 5% de probabilidade pelo teste Tukey.

## 6. CONCLUSÕES

Com base nos resultados do estudo das possibilidades de utilização da CBC como adição em argamassas em substituição parcial do cimento, pode-se tirar as seguintes conclusões:

- Os resultados mostraram que o bagaço de cana-de-açúcar utilizado apresentou um rendimento de cinza de bagaço de cana-de-açúcar(CBC) de 10%, com teor  $\text{SiO}_2$  de 84% e com 5% de carbono.
- A sílica na CBC apresenta-se tanto na fase amorfa quanto nas fases cristalinas de Cristobalita e Quartzo. Os resultados encontrados para a composição granulométrica e área de superfície demonstraram que a cinza em estudo é composta por partículas com tamanhos entre 1 e 14  $\mu\text{m}$  e com uma área de superfície da ordem de 24  $\text{m}^2/\text{g}$ .
- Em relação ao estudo do tempo de pega inicial e final, foi observado que as adições de 10%, 20% e 30% de CBC acarretaram um retardo de 10 min no intervalo de tempo entre os tempos de pega.
- Os resultados encontrados para os índices de atividade pozolânica comprovam a pozolanicidade da CBC.
- As argamassas com maiores teores de cinza tendem a ser mais porosas, o que justifica os maiores valores de absorção

encontrados. Em relação à massa específica, a substituição parcial do cimento Portland por até 30% de cinzas na mistura não provocou qualquer modificação significativa.

- Os ensaios de compressão das argamassas com teores de CBC entre 0 e 30%, aos 7 e 28 dias, indicaram a possibilidade de substituição de até 20% do cimento pela CBC, sem prejuízo da resistência.
- A adição de 30% do cimento pela CBC, pode ser realizada, desde que não seja exigido do material uma resistência igual a encontrada nos corpos de prova com 100% cimento.

É importante ressaltar que os resultados obtidos são específicos para a cinza de bagaço de cana-de-açúcar obtida. Diferentes procedimentos de queima podem ser empregados para a obtenção de cinza sem as fases cristalinas. Além disso, um pré-tratamento do bagaço de cana-de-açúcar evitaria possível contaminação por quartzo.

Mesmo com composição ainda não completamente apropriada, a cinza de bagaço de cana-de-açúcar manteve as propriedades básicas principais sem alteração muito intensa das argamassas.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AITCIN, P. C. **Concreto de alto desempenho**. 1ª ed., São Paulo, Editora PINI, 2000.

ALMEIDA, I. R. **Betões de alta resistência e durabilidade, composição e características**. Tese de Doutorado. Universidade Técnica de Lisboa, 1990.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE CIMENTO PORTLAND (ABCP). **Guia básico de utilização do cimento portland**. 7.ed. São Paulo, 2002. 28p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE CIMENTO PORTLAND (ABCP). **Uma breve história do cimento Portland**. Disponível em: <<http://www.abcp.org.br>>. Acesso em 05 de junho de 2005.

**ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 5733:** Cimento Portland de alta resistência inicial. Rio de Janeiro, 1993. 3p

**ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 5738:** Moldagem e cura de corpos de prova de concreto cilíndricos ou prismáticos. Rio de Janeiro, 1992. 4p.

**ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 5743:** Determinação de resíduo insolúvel cimento portland. Rio de Janeiro, 1989. 5p

**ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 5744:** Análise Química de Cimento Portland - Determinação de Resíduo Insolúvel. Rio de Janeiro, 1989. 7p

**ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 5745:** Cimento Portland - Determinação do anidrido sulfúrico. Rio de Janeiro, 1989. 5p

**ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 5747:** Cimento Portland - Determinação de óxido de sódio e óxido de potássio por fotometria de chama. Rio de Janeiro, 1989. 4p

**ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 5752:** Materiais pozolânicos - Determinação de atividade pozolânica com cimento Portland - Índice de atividade pozolânica com cimento. Rio de Janeiro, 1992. 3p.

**ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 7214:** Areia Normal para Ensaio de Cimento. Rio de Janeiro, 1982. 7p.

**ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 7215:** Cimento Portland – Determinação da resistência a compressão. Rio de Janeiro, 1991. 7p.

**ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 7223:** Determinação da consistência pelo abatimento do tronco de cone. Rio de Janeiro, 1991. 7p

**ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 9203:** Determinação de óxido de cálcio cimento portland. Rio de Janeiro, 1985. 5p

**ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 9777:** Determinação da absorção de água em agregados miúdos. Rio de Janeiro, 1991. 4p.

**ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 9778:** Determinação da absorção de água por imersão, Índice de vazios e massa específica. Rio de Janeiro, 1987. 5p.

**ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 9937:** **Determinação da absorção e da massa específica de agregados graúdos.** Rio de Janeiro, 1991. 4p.

**ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 11580:** Determinação da água da pasta de consistência normal). Rio de Janeiro, 1982. 3p.

**ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 11581:** Determinação dos tempos de pega. Rio de Janeiro, 1982. 4p.

**ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 11583:**  
Determinação de anidrido silícico cimento portland. Rio de Janeiro, 1990. 5p

BACHE, H. H. **Densified cement/ultra - fine particle-based materials.**  
Second International Conference on superplasticizers in concrete, 10-12 june,  
Ottawa, Canada, published by Aalborg Cement Aalborg, PO Box 163, DK-9100  
Aalborg Denmark, 12pp, 1981.

BARATA, M. S. **Concreto de alto desempenho no Estado do Pará: Estudo de viabilidade técnica e econômica de produção de concreto de alto desempenho com os materiais disponíveis em Belém através do emprego de adições de sílica ativa e metacaulim.** Tese Doutorado, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 1998.

BARBOSA, M.F., LIMA, E., PIRES SOBRINHO, C. W. A. **Estudo de argamassas com adições de cinza de casca de arroz e cinza de cana-de-açúcar.** VII Encontro Nacional de Tecnologia do Ambiente Construído Qualidade no Processo Construtivo. 27 A 30 de Abril de 1998 – Florianópolis – SC.

BASILIO, F. A. – **Cimento Portland. Estudo Técnico.** 5<sup>a</sup> ed. São Paulo, ABCP, 1983.

BUI, D.D. **Rice husk ash as a mineral admixture for high performance concrete,** Delft University Press, ISBN: 90-407-2139-4, pp.122, The Netherlands, 2001.

CINCOTTO, M.A. **Utilização de subprodutos e resíduos na indústria da construção civil.** A Construção, São Paulo, v.1855, p.27-30, 1983. (IPT - Encarte TE, 9)

CINCOTTO, M.A.; KAUPATEZ, R.M.Z. **Seleção de materiais quanto a atividade pozolânica,** in Tecnologia das Edificações. São Paulo: IPT-PINI, 1988, pp. 23-26.

COOK, D.J. Rice husk ash. In: Swamy, R.N. (ed). **Concrete technology and design** - v.3: Cement replacement materials. Blackie & Son Ltd, London, 1986.

CORDEIRO, G.C.; TOLEDO FILHO, R.D.; FAIRBAIRN, E.M.R.; TAVARES, L. M. M. **Estudo do processo de moagem da cinza do bagaço da cana-de-açúcar visando seu emprego como aditivo mineral para concreto.**

Conferência Brasileira de Materiais e Tecnologias Não-Convencionais: Habitações e Infra-Estrutura de Interesse Social. Brasil-NOCMAT 2004. Pirassununga, SP, Brasil, 29 de outubro – 3 de novembro, 2004.

DE LARRARD, J. F.; GORSE, J. F.; PUCH, C. **Comparative study of various silica fumes as additives in high-performance cementitious materials.** Materials and Structures, 1992, 25, pp. 265-272.

FNP Consultoria & Comércio Ltda. Disponível em: <http://www.fnp.com.br/>. Acesso em 05 de junho 2005.

FREITAS, E.G.A.; RODRIGUES, E.H.V.; ARAUJO, R.C.L.; FAY, I. **Efeito da adição de cinzas de bagaço de cana na resistência à compressão de argamassa normal.** In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA AGRÍCOLA, 27., 1998, Poços de Caldas. *Anais...* Lavras: Sociedade Brasileira de Engenharia Agrícola, 1998. v.4, p.219-21.

FREITAS, F. A. E., **Microfissuração e evolução da hidratação de concreto de cimento Portland, com e sem adição de escória, por meio de análise de imagens.** Tese de Mestrado, Universidade Federal de Campinas. 2001.

GARTNER, E. **Industrially interesting approaches to “low-CO<sub>2</sub>” cements.** Cement and Concrete research 34 (2004) 1489-1498.

GOMES, P. C. C. **Estudo de parâmetros que influenciam a produção e as propriedades dos concretos de alta resistência.** Tese Mestrado, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 1995.

ISAIA, G. C. **Efeitos da nistura binárias e termárias de pozolanas em concreto de elevado desempenho: um estudo de durabilidade com vistas à corrosão da armadura.** Tese de doutorado em engenharia civil, Escola Politécnica, Universidade de São Paulo. São Paulo, 1995

JOHN, V. M.; CINCOTTO, M. A.; SILVA, M. G. **Cinza e aglomerantes alternativos.** In: FREIRE, W. J.; BERBALDO, A. L. Tecnologia e materiais alternativos de construção. Campinas: Editora da UNICAMP, 2003. cap.6, p. 145-190.

MASSAZZA, F. Pozzolana and Pozzolanitic Cements. In: Hewlett, P. C. (ed.), **Lea`s Chemistry of Cement and Concrete**, 4<sup>th</sup> edition, Arnold Publishers, London, pp.485-500, 1998.

METHA, P. K. **Rice husk ash – A unique supplementary cementing material**. In V.M. Malhotra (ed.), *Advances in concretes technology*, 2<sup>a</sup> ed. Ottawa: Canmet, 1992, pp 407-411.

METHA, P.K. e MONTEIRO, P.J.M. **Concreto: Estrutura, Propriedades e Materiais**; Editora Pini Ltda, São Paulo, 1a ed., 1998.

MILLET, J; HOMMEY, R.; BRIVOT, F. **Dosage de la phase vitreuse dans les matériaux pouzzolaniques**. Bull. Liaison Labo P. Et Ch., nº 92, nov-dez., 1977, pp 101-104.

MITCHELL, D.R.G.; HINCZAK, I.; DAY, R.A. **Interaction of silica fume with calcium hydroxide solutions and hydrated cement pastes**, *Cement and Concrete Research*, v.11, pp.1571-1584, 1998.

NEVILLE, A. M. **Propriedades do concreto**. Trad Salvador E. Giammusso. São Paulo: PINI, 1982.

PETRUCCI, E.G.R. **Concreto de Cimento Portland**. – 13. ed. Rev. por Vladimir Antonio Paulon – São Paulo: Globo, 1998.

RICHARDSON, I.G. **The Nature of the hydration products in hardened cement pastes**, *Cement & Concrete Composites*, 22, pp.97-113, 2000.

RODRIGUES, C. S. **Efeito da adição da cinza da casca de arroz no comportamento de compósitos cimentícios reforçados por polpa de bambu**. Tese de Doutorado. Engenharia Civil PUC – Rio de Janeiro, 2004.

SEGRE, N.C. **Reutilização de borracha de pneus usados como adição em pasta de cimento**. Tese de Doutorado. Instituto de Química - Universidade Estadual de Campinas, 1999.

SINDICATO NACIONAL DA INDÚSTRIA DE CIMENTO (SNIC,2004). **Relatório Anual 2004**. Disponível em: <<http://www.snic.org.br/pdf/relat2004-5web.pdf>>. Acesso em 05 de junho 2005.

TAYLOR, H.F.W. **Cement chemistry**, Academic Press-Harcourt Brace Jovanovich pub., pp. 495, 1992.

**VALENCIANO, M.C. M. Incorporação de resíduos agroindustriais e seus efeitos sobre as características físico-mecânicas de tijolos de solo melhorado com cimento.** 102 f. Tese de Mestrado - Faculdade de Engenharia Agrícola, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 1999.