

**UNIVERSIDADE ESTADUAL DE MARINGÁ**  
**CENTRO DE TECNOLOGIA**  
**DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL**  
**PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA URBANA**

**IGO HENRIQUE SILVA NUNES**

**ESTUDO DAS CARACTERÍSTICAS FÍSICAS E QUÍMICAS DA**  
**CINZA DO BAGAÇO DE CANA-DE-AÇUCAR**  
**PARA USO NA CONSTRUÇÃO**

**MARINGÁ**

**2009**

**IGO HENRIQUE SILVA NUNES**

**ESTUDO DAS CARACTERÍSTICAS FÍSICAS E QUÍMICAS DA  
CINZA DO BAGAÇO DE CANA-DE-AÇUCAR  
PARA USO NA CONSTRUÇÃO**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Urbana da Universidade Estadual de Maringá como requisito parcial para obtenção do título de Mestre em Engenharia Urbana.

Orientador: Prof. Dr. Romel Dias Vanderlei.

**MARINGÁ**

**2009**

Dados Internacionais de Catalogação-na-Publicação (CIP)  
(Biblioteca Setorial – UEM. CRC, Cianorte – PR, Brasil)

N972e

Nunes, Igo Henrique Silva.

Estudo das características físicas e químicas da cinza do bagaço de cana-de-açúcar para uso na construção / Igo Henrique Silva Nunes. -- Maringá, 2009. 65 f.

Orientador: Prof. Dr. Romel Dias Vanderlei.

Dissertação (mestrado) - Universidade Estadual de Maringá. Centro de Tecnologia. Departamento de Engenharia Civil. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Urbana, 2009.

1. Cinza do bagaço da cana-de-açúcar. 2. Pozolana. 3. Atividade pozolânica. 4. Resíduo agroindustrial. I. Universidade Estadual de Maringá. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Urbana. II. Título.

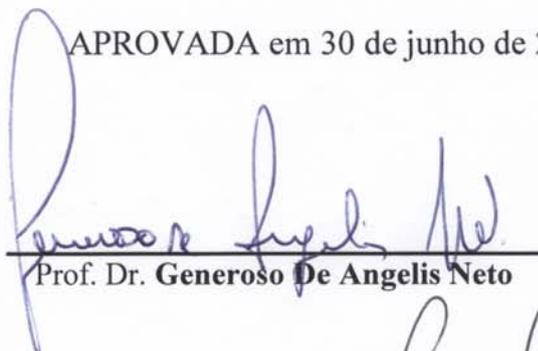
CDD 21.ed. - 624.1833  
NBR/CIP - 12899 AACR

IGO HENRIQUE SILVA NUNES

**Estudo das Características Físicas e Químicas da Cinza do Bagaço  
de Cana-de-açúcar para Uso na Construção**

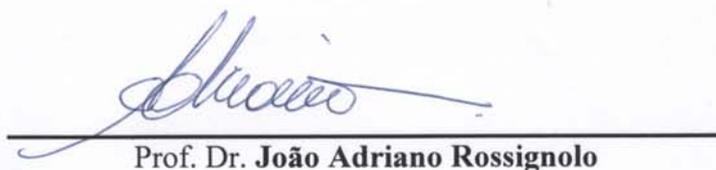
Dissertação apresentada à Universidade Estadual de Maringá, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Urbana, na área de concentração Infraestrutura e Sistemas Urbanos, para obtenção do título de Mestre.

APROVADA em 30 de junho de 2009.



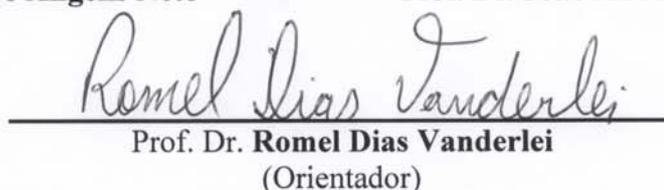
---

Prof. Dr. **Generoso De Angelis Neto**



---

Prof. Dr. **João Adriano Rossignolo**



---

Prof. Dr. **Romel Dias Vanderlei**  
(Orientador)

## **AGRADECIMENTOS**

*À Deus, pelo seu amor incondicional.*

*À Universidade Estadual de Maringá.*

*Ao Profº Dr. Romel Dias Vanderlei pela serenidade e ao apoio durante a pesquisa.*

*A todos os professores do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Urbana da Universidade Estadual de Maringá.*

*Aos colegas, futuros engenheiros civis, Cíntia, Maicon e Marcelo pelos ensaios de reologia do cimento e resistência do concretos.*

*Aos colegas Cido e Cipriano do Laboratório de Mecânica dos Solos e Valter e Celso Laboratório de Materiais de Construção da Universidade Estadual de Maringá pelo auxílio na realização dos ensaios.*

*Ao Instituto de Pesquisas Técnicas de São Paulo pela realização do ensaio de atividade pozolânica.*

*Ao Profº Dr. Ivair Aparecido dos Santos pela contribuição no ensaio de Difração Raios-X realizado na Central de Análises Avançadas da Universidade Estadual de Maringá.*

*Ao Profº. Msc. Edson pela realização dos ensaios no Laboratório de Saneamento Básico da Universidade Estadual de Maringá.*

*Ao Departamento de Engenharia Química pelo ensaio de Superfície Específica.*

*À empresa Santa Terezinha e Usaciga pelo fornecimento do material e explicações.*

*A todos os colegas do mestrado que estiveram presentes  
durante a elaboração deste trabalho.*

*Ao Douglas, secretário do programa de pós-graduação em  
Engenharia Urbana, pelo excelente atendimento.*

*A minha família pelo apoio.*

*À todos que de alguma maneira fizeram parte deste trabalho.*

## RESUMO

O bagaço da cana-de-açúcar é um dos subprodutos da indústria da cana, assim como a sacarose e a palha. Atualmente o bagaço gerado da usina é consumido para produção de energia por meio da co-geração, tornando a usina auto-sustentável energeticamente e, em alguns casos, há venda do excedente de energia para distribuidoras. Durante o processo de queima do bagaço de cana-de-açúcar nas fornalhas das caldeiras, ocorre a geração de cinzas residuais. Pesquisas indicam que as cinzas do bagaço da cana-de-açúcar (CBC) possuem predominantemente em sua composição sílica que, quando moída em granulometria muito fina, apresenta características químicas e físicas que podem proporcionar ao material, atividade pozolânica e efeito filler. Por apresentar as características já confirmadas, a CBC pode ser utilizada como matéria-prima na substituição parcial do cimento Portland para produção de argamassas e concretos. Este relatório tem como objetivo apresentar as características físicas e químicas das cinzas do bagaço da cana-de-açúcar de quatro usinas localizadas na região de Maringá, visando sua aplicação na produção de concreto. Para isso, inicialmente foi feita uma revisão bibliográfica para conhecimento das experiências realizadas no Brasil, envolvendo os ensaios e a avaliação do desempenho das cinzas. Em seguida, foram realizados os seguintes ensaios de caracterização: teor de umidade, matéria orgânica, e carbono orgânico, composição granulométrica, massa específica, superfície específica, difração de raios-x, atividade pozolânica, reologia entre cimento e cinza e propriedades mecânicas do concreto feitos da cinza. Esta pesquisa vem a contribuir para a aplicação da CBC como material alternativo para aplicação na construção civil como exemplo para o estudo de concretos feitos com a cinza do bagaço da cana-de-açúcar em substituição parcial ao cimento Portland.

**Palavras-chave:** cinza do bagaço da cana-de-açúcar; pozolana; atividade pozolânica, resíduo agroindustrial.

## ABSTRACT

The bagasse from sugar cane is one of the byproducts of sugar cane industry, as well as sucrose and straw. Currently the bagasse generated in the plant is consumed for energy production through co-generation, making the plant self-sustainable energy and in some cases, sale of spare energy to electricity. During the process of burning the bagasse of sugar cane in the furnaces of boilers, occurs the generation of residual ash. Polls indicate that the ashes of bagasse from sugar cane (CBC) have predominantly silica in its composition which, when ground into very fine particle size, has physical and chemical characteristics that can provide the material effect of filler and pozzolanic activity. By presenting the characteristics already confirmed, the CBC can be used as raw material in the partial replacement of Portland cement to produce mortars and concrete. This paper aims to present the physical and chemical characteristics of ash from bagasse from sugar cane in four plants located in the region of Maringá, to its application in the production of concrete. For this, first was a literature review for information on the experiences in Brazil, involving testing and benchmarking of ash. Then, the following tests were performed for characterization: moisture content, organic matter and organic carbon, particle size, density, specific surface, chemical composition, pozzolanic activity, rheology of cement and gray and mechanical properties of concrete made with gray. This research is to contribute to the implementation of the CBC as alternative material for application in construction as an example the study of concrete made with the ashes of bagasse of sugar cane to replace the part Portland cement.

**Keywords:** bagasse ash in the sugar cane; pozzolan, pozzolanic activity, agro-industrial residue.

## SUMÁRIO

<b>RESUMO</b>	<b>v</b>
<b>ABSTRACT</b>	<b>vi</b>
<b>SUMÁRIO</b>	<b>vii</b>
<b>LISTA DE FIGURAS</b>	<b>ix</b>
<b>LISTA DE TABELAS</b>	<b>xi</b>
<b><u>1</u>    <u>INTRODUÇÃO</u></b>	<b><u>1</u></b>
<b>1.1    JUSTIFICATIVA DO TRABALHO</b>	<b>2</b>
<b>1.2    OBJETIVOS</b>	<b>3</b>
<b>1.3    ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO</b>	<b>3</b>
<b><u>2</u>    <u>REVISÃO TEÓRICA</u></b>	<b><u>5</u></b>
<b>2.1    PRODUÇÃO DE CANA-DE-AÇÚCAR</b>	<b>5</b>
<b>2.2    RESÍDUOS GERADOS PELA CANA-DE-AÇÚCAR</b>	<b>7</b>
<b>2.3    GERAÇÃO DAS CINZAS</b>	<b>8</b>
<b>2.4    DISPOSIÇÃO FINAL DAS CINZAS DO BAGAÇO</b>	<b>10</b>
<b>2.5    ESTUDO DA CBC</b>	<b>11</b>
2.5.1    CARACTERÍSTICAS DAS CINZAS	14
<b><u>3</u>    <u>MATERIAIS E MÉTODOS</u></b>	<b><u>16</u></b>
<b>3.1    MATERIAIS</b>	<b>17</b>
3.1.1    CIMENTO PORTLAND	17
3.1.2    ADITIVO QUÍMICO	17
3.1.3    AGREGADO MIÚDO	18
3.1.4    AGREGADO GRAÚDO	18

3.1.5	ÁGUA	19
3.1.6	CINZAS	19
<b>3.2</b>	<b>MÉTODOS</b>	<b>21</b>
3.2.1	ANÁLISE GRANULOMÉTRICA	22
3.2.2	MASSA ESPECÍFICA	24
3.2.3	ÁREA ESPECÍFICA	25
3.2.4	TEOR DE UMIDADE, MATÉRIA ORGÂNICA E CARBONO ORGÂNICO	25
3.2.5	ATIVIDADE POZOLÂNICA	27
3.2.6	DIFRAÇÃO DE RAIOS-X	28
3.2.7	REOLOGIA ENTRE CIMENTO E CBC	28
3.2.8	PROPRIEDADES MECÂNICAS DO CONCRETO FEITOS COM CBC	31
3.2.8.1	Programa Experimental	31
3.2.8.2	Concretagem dos Corpos-de-prova	32
3.2.8.3	Ensaio de Resistência à Compressão	33
<b>4</b>	<b>RESULTADOS E DISCUSSÃO</b>	<b>34</b>
<b>4.1</b>	<b>CARACTERIZAÇÃO QUÍMICA E FÍSICA</b>	<b>34</b>
4.1.1	MATÉRIA ORGÂNICA E CARBONO ORGÂNICO	34
4.1.2	DIFRAÇÃO DE RAIOS-X	35
4.1.3	ATIVIDADE POZOLÂNICA	37
4.1.4	ÁREA ESPECÍFICA	38
4.1.5	MASSA ESPECÍFICA E TEOR DE UMIDADE	38
4.1.6	ANÁLISE GRANULOMÉTRICA	39
4.1.7	REOLOGIA ENTRE O CIMENTO E A CBC	42
4.1.8	PROPRIEDADES MECÂNICAS DOS CONCRETOS FEITOS COM CBC	45
<b>5</b>	<b>CONCLUSÃO</b>	<b>49</b>
<b>6</b>	<b>REFERÊNCIAS</b>	<b>51</b>

**LISTA DE FIGURAS**

<b>FIGURA 1 - EVOLUÇÃO DA PRODUTIVIDADE DA CANA-DE-AÇÚCAR NO BRASIL</b>	<b>5</b>
<b>FIGURA 2 – USINAS E DESTILARIAS DO PARANÁ</b>	<b>6</b>
<b>FIGURA 3 - PRODUÇÃO DE CANA MOÍDA NO PARANÁ, SAFRAS 90/91 A 07/08</b>	<b>7</b>
<b>FIGURA 4: PROCESSO DE GERAÇÃO DAS CINZAS</b>	<b>9</b>
<b>FIGURA 5 - FLUXOGRAMA SIMPLIFICADO DA PRODUÇÃO DE CBC</b>	<b>10</b>
<b>FIGURA 6: TRANSPORTE DA CINZA RESIDUAL ATÉ O TANQUE DE DECANTAÇÃO</b>	<b>10</b>
<b>FIGURA 7 – CURVA DE DISTRIBUIÇÃO GRANULOMÉTRICA DA AREIA</b>	<b>18</b>
<b>FIGURA 8 – CURVA DE DISTRIBUIÇÃO GRANULOMÉTRICA DA PEDRA BRITADA Nº 1.</b>	<b>19</b>
<b>FIGURA 9: CALDEIRA DA USINA DE CIDADE GAÚCHA</b>	<b>21</b>
<b>FIGURA 10: ANÁLISE GRANULOMÉTRICA POR SEDIMENTAÇÃO.</b>	<b>22</b>
<b>FIGURA 11: ENSAIO DE DENSIDADE COM O PICNÔMETRO</b>	<b>25</b>
<b>FIGURA 12: PISTILO, GRAL E LÂMINAS (A); DIFRATÔMETRO (B)</b>	<b>28</b>
<b>FIGURA 16 – EQUIPAMENTOS UTILIZADOS</b>	<b>32</b>
<b>FIGURA 17 – MOLDAGEM DOS CORPOS-DE-PROVA</b>	<b>33</b>
<b>FIGURA 18 – PRENSA HIDRÁULICA DE 100 TONELADAS</b>	<b>33</b>
<b>FIGURA 19 – AMOSTRAS APÓS PERMANECEREM POR 1 HORA A 550°C EM MUFLA</b>	<b>35</b>
<b>FIGURA 20 – DR-X – IGUATEMI</b>	<b>35</b>
<b>FIGURA 21 – DR-X – CIDADE GAÚCHA</b>	<b>36</b>
<b>FIGURA 22 – DR-X – RONDON</b>	<b>36</b>
<b>FIGURA 23 – DR-X – SÃO TOMÉ</b>	<b>37</b>
<b>FIGURA 24 - CURVAS GRANULOMÉTRICAS</b>	<b>40</b>
<b>FIGURA 25 – VISCOSIDADE DA PASTA DO TRAÇO PADRÃO</b>	<b>42</b>
<b>FIGURA 26 – VISCOSIDADE DA PASTA COM 5% DE CBC</b>	<b>43</b>

<b>FIGURA 27 – VISCOSIDADE DA PASTA COM 10% DE CBC</b>	<b>43</b>
<b>FIGURA 28 – VISCOSIDADE DA PASTA COM 15% DE CBC</b>	<b>44</b>
<b>FIGURA 29 – VISCOSIDADE DA PASTA COM 20% DE CBC</b>	<b>44</b>
<b>FIGURA 30 – COMPORTAMENTO DAS RESISTÊNCIAS NAS DOSAGENS PROPOSTAS AO LONGO DO TEMPO</b>	<b>47</b>
<b>FIGURA 31 – COMPORTAMENTO DAS RESISTÊNCIAS PARA 3, 7 E 28 DIAS EM FUNÇÃO DOS TEORES DE CBC</b>	<b>47</b>

**LISTA DE TABELAS**

<b>TABELA 1 – RESÍDUOS GERADOS PELA-CANA-DE-AÇÚCAR</b>	<b>8</b>
<b>TABELA 2 – PROPRIEDADES QUÍMICAS</b>	<b>14</b>
<b>TABELA 3 – CARACTERIZAÇÃO DO CIMENTO CII-F 32</b>	<b>17</b>
<b>TABELA 4 – CARACTERÍSTICAS DO ADITIVO QUÍMICO</b>	<b>17</b>
<b>TABELA 5 – CARACTERIZAÇÃO DO AGREGADO MIÚDO</b>	<b>18</b>
<b>TABELA 6 – CARACTERIZAÇÃO DA PEDRA BRITADA</b>	<b>19</b>
<b>TABELA 7 – DETALHES DAS USINAS ESCOLHIDAS</b>	<b>20</b>
<b>TABELA 8 – PROGRAMA EXPERIMENTAL</b>	<b>32</b>
<b>TABELA 9 – TEOR DE UMIDADE, MATÉRIA ORGÂNICA TOTAL E CARBONO ORGÂNICO</b>	<b>34</b>
<b>TABELA 10 – ÍNDICE DE ATIVIDADE POZOLANICA</b>	<b>38</b>
<b>TABELA 11 – ÁREA ESPECÍFICA</b>	<b>38</b>
<b>TABELA 12 – MASSA ESPECÍFICA</b>	<b>38</b>
<b>TABELA 13 – TEOR DE UMIDADE</b>	<b>39</b>
<b>TABELA 14 – PORCENTAGEM PASSANTE (%)</b>	<b>40</b>
<b>TABELA 15 – PORCENTAGEM RETIDA - CLASSIFICAÇÃO GRANULOMÉTRICA NBR 6502/1995</b>	<b>41</b>
<b>TABELA 16 – COEFICIENTES DE UNIFORMIDADE E CURVATURA</b>	<b>41</b>
<b>TABELA 17 – UNIFORMIDADE E DISTRIBUIÇÃO GRANULOMÉTRICA</b>	<b>41</b>
<b>TABELA 18 – PONTO DE SATURAÇÃO</b>	<b>45</b>
<b>TABELA 19 – TAXAS DE SUBSTITUIÇÃO DE CIMENTO PELA CBC</b>	<b>46</b>
<b>TABELA 20 – RESISTÊNCIA A COMPRESSÃO SIMPLES</b>	<b>46</b>
<b>TABELA 21 – VARIAÇÃO DA RESISTÊNCIA A COMPRESSÃO</b>	<b>48</b>

## 1 INTRODUÇÃO

---

O concreto é um dos materiais mais utilizados no mundo, sendo que o elemento mais consumido pelo homem é a água. A alta resistência mecânica, a facilidade de ser moldado para os mais diversos tipos de obra e seu custo relativamente baixo quando comparado a outros materiais difundiu o uso do concreto na engenharia. Segundo MEHTA (2001) a produção mundial de cimento anual é de aproximadamente 1,6 bilhões de toneladas, e responsável por 7% da emissão global de dióxido de carbono na atmosfera. Concretos normalmente possuem em massa cerca de 12% de cimento e 80% de agregado que representa cerca de 10 a 11 bilhões de toneladas por ano de extração de areia, brita e cascalho MEHTA (2001).

Na indústria do concreto, 90% da emissão de carbono ocorre nos fornos que queimam o clínquer. É assim que Povindar Kumar Mehta, professor da Universidade de Berkeley (EUA), tenta convencer o setor da construção a repensar a fórmula e o próprio uso do concreto. Sua proposta inclui a atuação em três frentes, mas que têm uma palavra em comum: redução. Mehta defende que se consuma menos concreto nas novas estruturas, menos cimento nas misturas para concreto e pouco clínquer para produzir o cimento. Segundo Mehta, cerca de 50% a 70% da massa de clínquer presente no cimento Portland pode ser substituída por diversos materiais complementares. Entre os exemplos estão as cinzas volantes, pozolanas naturais e cinzas de casca de arroz. O especialista propõe que pelo menos dois desses materiais sejam utilizados de forma complementar ao clínquer, substituindo 40% em massa (TÉCHNE, 2008). Esta alternativa aparece nos dias atuais como questão fundamental na preservação do meio ambiente, tanto em função da redução do consumo de recursos naturais, quanto na minimização dos impactos ambientais oriundos da disposição final dos resíduos.

Segundo Cordeiro *et al.* (2005) atualmente, o Brasil é responsável pela produção de cerca de 60% do álcool etílico consumido no planeta e é o maior produtor mundial de cana-de-açúcar e açúcar. A cultura da cana-de-açúcar representa uma das principais atividades agrícolas e ocupa uma área plantada com aproximadamente 7 milhões de hectares para diversas finalidades, como indústria sucroalcooleira, produção de aguardente, forragem, etc. e está distribuída por grande parte do território nacional segundo levantamento da safra 2008 pela CONAB (Companhia Nacional de Abastecimento).

Santos *et al.* (2009) descrevem os principais subprodutos da indústria sucroalcooleira são: levedura, melaço, bagaço ou bagacilho, a torta de filtro e a vinhaça. CORDEIRO (2009) descreve que o bagaço gerado durante a moagem da cana-de-açúcar para extração do caldo, normalmente é queimado como combustível em caldeiras na própria usina e convertido em vapor d'água utilizado na produção de açúcar e álcool em processo denominado co-geração de energia. Durante a queima do bagaço da cana-de-açúcar são geradas as cinzas residuais e depositadas no solo. Segundo as pesquisas de CORDEIRO (2006), PAULA (2006), FREITAS (2005), e HERNÁNDEZ (1998) que possuem em sua composição teores de SiO<sub>2</sub> acima de 60% e demais óxidos em proporções variáveis. Segundo CORDEIRO (2006) essa variação principalmente para os dióxido de silício pode ser atribuído à presença de carbono residual e óxidos contaminantes.

CORDEIRO (2006) menciona que o ciclo de vida completo da biomassa, incluindo energia indireta dos equipamentos e insumos, o balanço nas emissões de CO<sub>2</sub> é praticamente nulo, 0,057 a 0,11 kg CO<sub>2</sub>/kWh, porque durante a fotossíntese a biomassa queimada é repostada no ciclo seguinte da cultura da cana. Como parte do dióxido de carbono está presente nas cinzas residuais descartadas, seu reaproveitamento e aplicação como material de construção pode contribuir para a sustentabilidade do setor.

## **1.1 JUSTIFICATIVA DO TRABALHO**

Segundo FREITAS (2005) o bagaço da cana-de-açúcar é um subproduto primário da indústria sucroalcooleira, sendo reaproveitado como combustível para as caldeiras. Apesar do grande potencial produtor de cinza do bagaço da cana-de-açúcar (CBC), são escassos os trabalhos realizados com esses resíduos no Brasil.

De acordo com a Associação dos Produtores de Bioenergia do Estado do Paraná (ALCOPAR), a área cultivável do setor representa uma parte ínfima das terras agricultáveis paranaenses, algo em torno de 3,5% (500 mil hectares), estando bastante limitada geograficamente.

Segundo dados do relatório da safra 2007/2008 da ALCOPAR (Figura 3), o Paraná conta com 30 unidades produtoras que produziram aproximadamente 40 milhões de toneladas de cana moídas na mesma safra, gerando 1.860.000 m<sup>3</sup> de álcool e 2.509.000 toneladas de açúcar.

Diante da possibilidade de utilização da CBC em substituição parcial ao cimento Portland, faz-se necessário um estudo amplo de caracterização e avaliação de seu real potencial como matéria-prima para a produção de concreto e pastas. Baseado neste uso potencial, este trabalho visa a suprir a carência de informações sobre a CBC da região de Maringá, além de levantar dados para os próximos estudos deste resíduo no âmbito da construção civil.

## **1.2 OBJETIVOS**

Este trabalho tem como objetivo buscar melhores alternativas para o destino da CBC, como sua utilização na construção civil e, assim, contribuir com o desenvolvimento sustentável. Para isso, pretende-se investigar as características físicas e químicas desse material, contribuindo para trabalhos que venham a desenvolver a aplicação da CBC em argamassas e concretos.

Especificamente, este trabalho pretende apresentar as características físicas e químicas das cinzas do bagaço da cana-de-açúcar geradas por quatro usinas localizadas na região de Maringá, evidenciando as seguintes características: teor de umidade, matéria orgânica, carbono orgânico, composição granulométrica, massa específica, pozolanicidade, área específica. Para os ensaios de reologia entre cimento e cinza e propriedades mecânicas do concreto feitos com as cinzas, foram testados apenas com a usina de Iguatemi, devido a distância próxima aos laboratórios da Universidade Estadual de Maringá e ao tempo de pesquisa restrito.

## **1.3 ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO**

O presente trabalho está estruturado em seis capítulos. Na Introdução é abordado a importância do trabalho e seus objetivos. Os demais capítulos estão organizados de forma a promover um maior conhecimento da CBC, como mostrado a seguir:

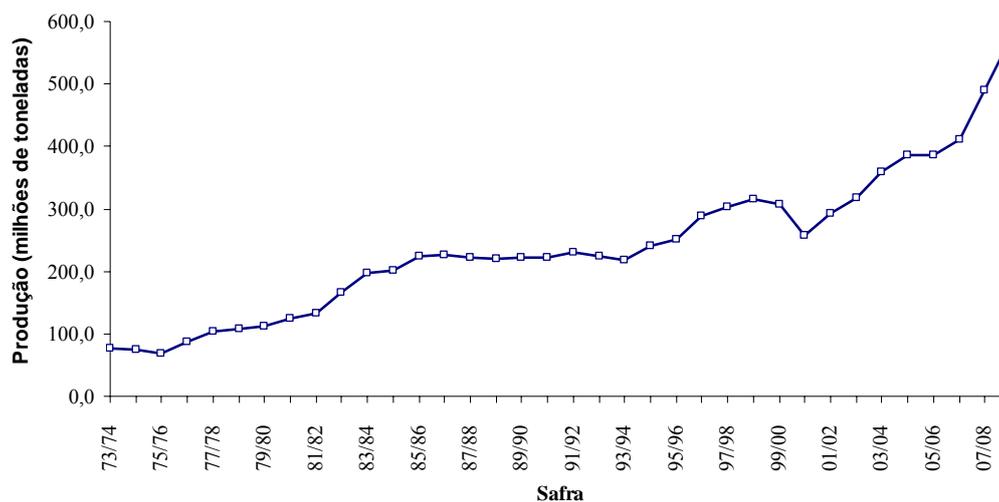
- Capítulo 2: revisão teórica com dados sobre a produção de cana-de-açúcar, e o subproduto alvo desta pesquisa;
- Capítulo 3: materiais e métodos utilizados;
- Capítulo 4: este capítulo apresentará o programa experimental e procedimentos de ensaios adotados para caracterizar as amostras de CBC;

- Capítulo 5: dedicado à discussão dos resultados obtidos no programa experimental;
- Capítulo 6: referências bibliográficas

## 2 REVISÃO TEÓRICA

### 2.1 PRODUÇÃO DE CANA-DE-AÇÚCAR

Segundo dados do Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento (2009) no levantamento na safra 2008/2009 foram produzidos aproximadamente 572 milhões de toneladas de cana-de-açúcar. Souza *et al.* (2007) descreve que esse setor é responsável por 3,65% do PIB Brasileiro, a produção brasileira de álcool expandiu-se muito a partir do Pró-álcool (criado em 1975 pelo governo brasileiro) e da mistura obrigatória do produto com a gasolina. A Figura 1 mostra a crescente evolução da produtividade da cana-de-açúcar no Brasil desde o início do Pró-álcool.



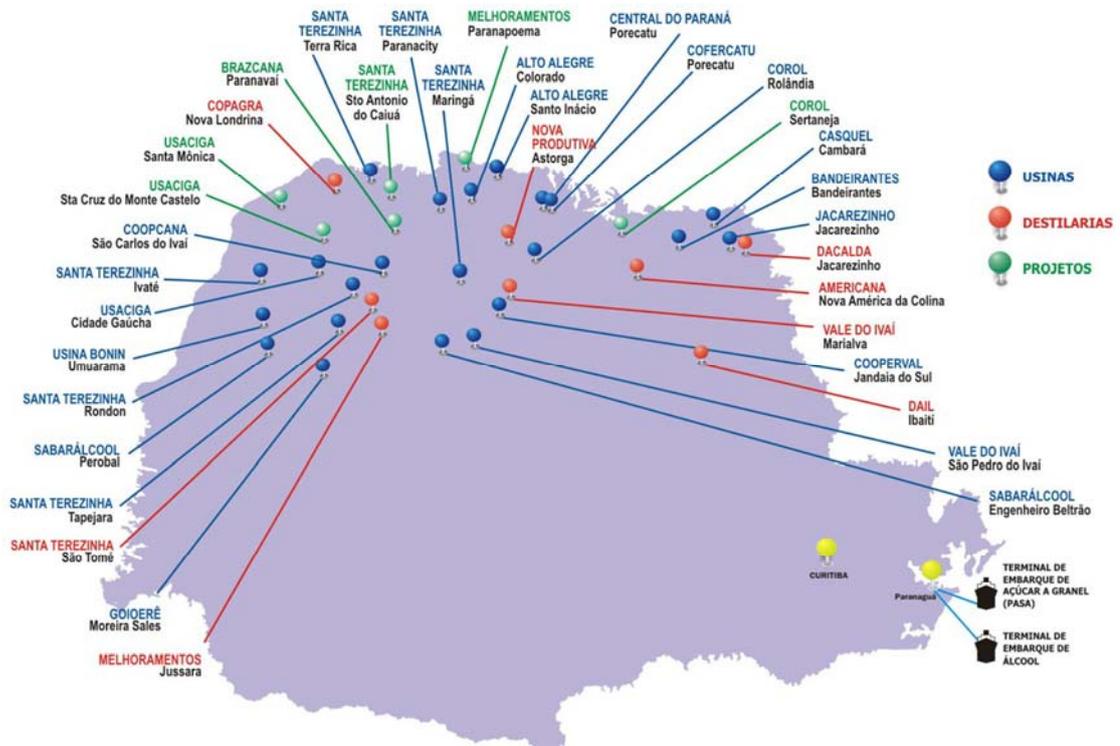
**Figura 1 - Evolução da produtividade da cana-de-açúcar no Brasil**

Fonte: (<http://www.alcopar.org.br> e <http://www.agricultura.gov.br/>)

O Paraná é o segundo maior produtor brasileiro de cana-de-açúcar, e irá ampliar a produção em 10% na safra 2008/2009, de 40 milhões de toneladas, para quase 45 milhões de toneladas. Segundo Associação dos Produtores de Bioenergia do Estado do Paraná (ALCOPAR), atualmente estão em funcionamento 30 usinas sucroalcooleiras (Figura 2), em 2009 outras duas novas usinas também devem ser inauguradas e existem ainda outros quatro projetos em estudo.

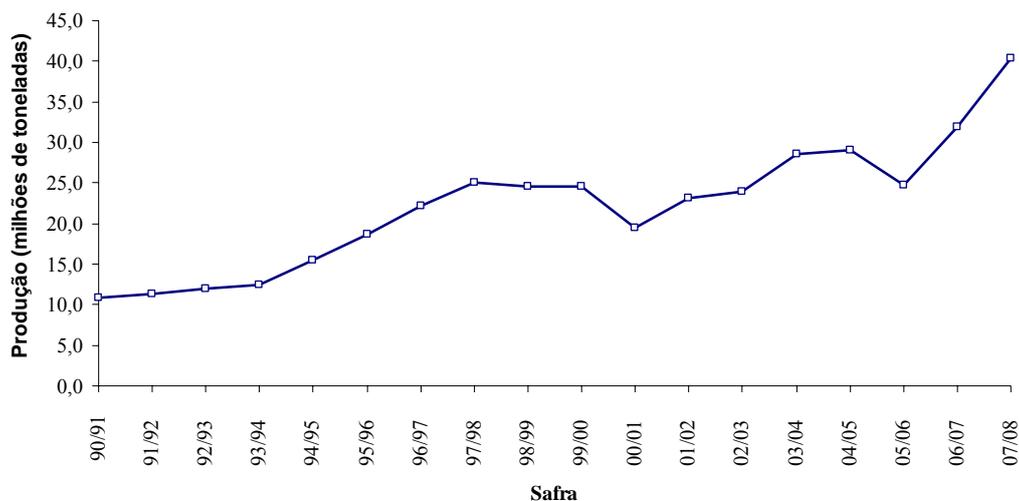
Segundo Wrege (2005) a concentração das usinas na região norte, noroeste e oeste do Paraná não é por acaso, por serem áreas de menor altitude com clima tropical, apresentam menor ocorrência de geadas, com pelo menos uma a cada dez anos, na média, o que torna as regiões aptas para o plantio da cana-de-açúcar.

Tomando como base estudos da FIESP (2001), para cada tonelada de cana-de-açúcar que alimenta o processo de moagem são geradas 260 kg de bagaço, onde aproximadamente 95% deste é destinado a alimentação da caldeira, estima-se que a geração de resíduos de cinza é de 6,2 kg de cinza/260 kg de bagaço, logo para os 45 milhões de toneladas, podem gerar aproximadamente 265 mil toneladas de cinza na atual safra do Paraná.



**Figura 2 – USINAS E DESTILARIAS DO PARANÁ**

Fonte: (<http://www.alcopar.org.br>)



**Figura 3 - Produção de Cana Moída no Paraná, safras 90/91 a 07/08**

**Fonte: (<http://www.alcopar.org.br>)**

## **2.2 RESÍDUOS GERADOS PELA CANA-DE-AÇÚCAR**

As usinas de cana produzem diversos tipos de resíduos, os principais segundo FIESP/CIESP (2001) são: a palha, o bagaço e o resíduo da cinza resultante da queima do bagaço, sendo classificados quanto a categoria como de atividades rurais e quanto a natureza como classe II. Esses resíduos são utilizados para diversos fins, a Tabela 1 apresenta os principais tipos e suas respectivas origens e utilidades.

**Tabela 1 – Resíduos gerados pela-cana-de-açúcar****Fonte: FIESP (2001) e FREITAS (2005)**

Resíduo	Valores médios de produção	Origem	Destino
Bagaço	260 kg bagaço / tonelada de cana moída	Moagem da cana e extração do caldo	Cogeração de energia elétrica
			Uso como adubo
			Produção de ração animal
			Produção de aglomerados
Torta de filtração	-	Filtração do lodo gerado na clarificação	Produção de celulose
			Uso como condicionador do solo
Vinhoto	-	Resíduo da destilação do melaço fermentado (para obtenção do álcool)	Produção de ração animal
			Uso como fertilizante
Melaço	-	Fabricação do açúcar	Praticamente todo usado na produção do álcool
Palha	18,2 toneladas de palha seca / hectare de área plantada	Folhas secas, folhas verdes e ponteiros. Corte da cana para moagem.	Disposto no solo junto com o vinhoto para adubação do terreno.
CBC	23,8 kg de cinza/ tonelada de bagaço que alimenta a caldeira	Queima do bagaço em caldeiras para co-geração de energia	Encaminhada juntamente com as tortas de filtro e a palha na adubação do solo

### 2.3 GERAÇÃO DAS CINZAS

Souza *et al.* (2007) descreve a geração das cinzas sucedem em seis etapas apresentadas na Figura 4. A colheita pode ser realizada mecanicamente, sem a queima da cana, através de colhedoras ou manualmente pelos funcionários (Figura 4a). Em seguida a cana-de-açúcar é transportada ao setor industrial por meio de caminhões (Figura 4b), onde é lavada (Figura 4c) para retirar o solo e impurezas provenientes da lavoura. Em seguida, é desfibrada (Figura 4d) e enviada à moenda para extração do caldo. Cerca de 96% do açúcar contido na cana é extraído. O bagaço resultante com cerca de 4% de açúcar e umidade média em torno de 50% é transportado da moenda para depósitos a céu aberto (Figuras 4e e 4f) onde permanece até ser queimada em caldeira, ou é vendido para outras indústrias do setor. Em seguida o bagaço é transportado por meio de uma esteira rolante (Figura 4g) até a caldeira (Figura 4h) onde é queimado restando cinzas residuais (Figura 4i). A umidade do bagaço que alimenta as caldeiras interfere diretamente no rendimento da combustão e nas

características da cinza gerada Souza *et al.* (2007). O fluxograma da produção da CBC é apresentado na Figura 5.

Sobre a queima do bagaço durante a geração da energia elétrica, Souza *et al.* (2007) relatam que a quantidade, gases ( $\text{CO}_2$ ,  $\text{NO}_2$  e  $\text{CH}_4$ ) que contribuem para o aumento do efeito estufa emitidos é bem menor que a prática da queimada dos canaviais para facilitar a colheita manual da cana, o que atenua o impacto ambiental ocasionado na cadeia.



(a)



(b)



(c)



(d)



(e)



(f)



(g)



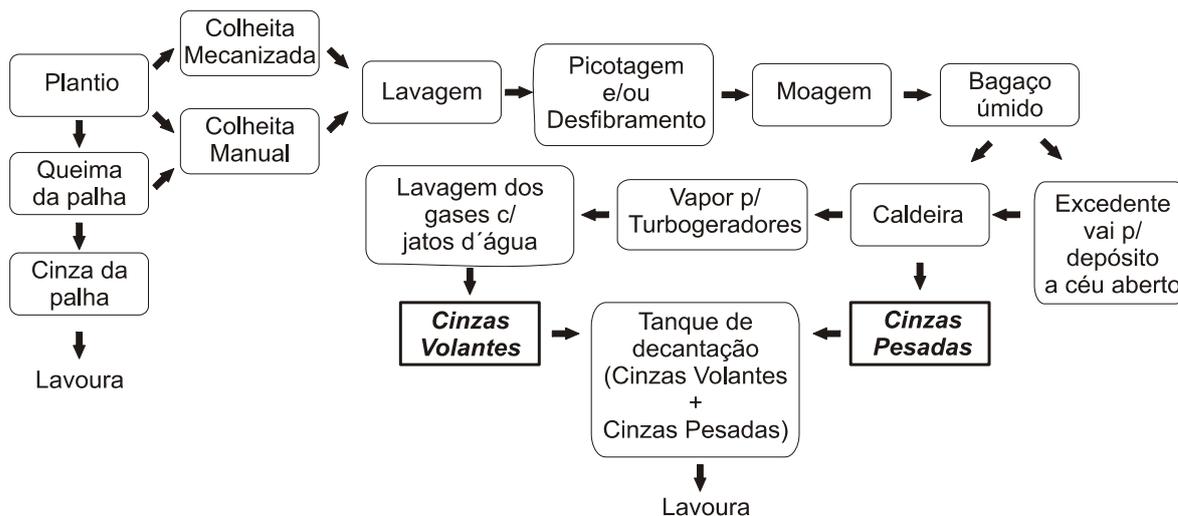
(h)



(i)

**Figura 4: Processo de geração das cinzas**

Fonte: Adaptado de SOUZA *et al.* (2007)



**Figura 5 - Fluxograma simplificado da produção de CBC**

Fonte: adaptado de FREITAS (2005)

#### 2.4 DISPOSIÇÃO FINAL DAS CINZAS DO BAGAÇO

Durante a queima do bagaço, a caldeira produz resíduos que podem ser lançados na atmosfera ou contidos pelos lavadores de cinzas e gases (Figura 6a). As águas residuárias transportam as cinzas até as lagoas de decantação (Figura 6b), onde permanecem até sua destinação final (SOUZA *et al.*, 2007).



(a)



(b)

**Figura 6: Transporte da cinza residual até o tanque de decantação**

Fonte: Adaptado de SOUZA *et al.* (2007)

Após entrevista com os administradores das usinas pesquisadas, constatou-se que um dos problemas enfrentados é a disposição final das cinzas. Após os tanques de decantação atingirem suas capacidades, as cinzas são retiradas e dispersas no solo. Segundo EMBRAPA (2008), as cinzas desse bagaço fornecem excelente adubo potássico-fosfatado,

podendo auxiliar a adubação da cultura. A sílica encontrada nas cinzas, segundo Korndörfer (1995), quando aplicada como adubo ao solo é apontada como uma alternativa no manejo de doenças patogênicas e ataque de pragas com reflexos sobre a produtividade do arroz e da cana-de-açúcar em particular. Acredita-se que o silício proporcione maior resistência às paredes das células tornando-as menos vulneráveis às enzimas de degradação.

## 2.5 ESTUDO DA CBC

O emprego da CBC possibilita a redução de problemas ambientais relacionados ao uso de cimento Portland em concreto, como grande quantidade requerida de matéria-prima natural (argila e calcário) e elevado montante de gases intensificadores do efeito estufa, sobretudo dióxido de carbono, emitidos para a atmosfera durante sua produção. CORDEIRO (2009).

A CBC tem sido estudada no Brasil há alguns anos, sua aplicação como pozolana pode ser na forma natural, passar por um tratamento prévio ou até mesmo ser produzida sob controle de temperatura e tempo, passando posteriormente por uma moagem.

De acordo com as condições de queima adotadas, é possível manter a sílica contida no bagaço em estado amorfo. Essa característica pode possibilitar o emprego desse resíduo como pozolana e, por conseguinte, reduzir as despesas e o impacto ambiental relativos à sua disposição no meio ambiente. Além disso, a incorporação da cinza pode agregar valor econômico ao resíduo agroindustrial e proporcionar vantagens técnicas e ambientais com a substituição parcial de cimento Portland (CORDEIRO, 2009).

A influência da substituição parcial do cimento por CBC na produção de argamassas é descrita em diversos trabalhos, Freitas (2005) estudou a resistência mecânica de argamassas com teores de 0, 5, 10, 15 e 20% de substituição do cimento Portland pela CBC de duas usinas. A CBC foi dividida em dois lotes sendo o primeiro submetido a temperatura de 600°C por 5h, e o outro lote a temperatura de 600°C por 5h além de moagens por períodos de 30min, 1h, 2h, 3h e 4h. Foram confeccionados corpos-de-prova para cada porcentagem de substituição e cada idade de ruptura (7, 14 e 28 dias). Os materiais utilizados foram: cimento Portland CPIIE-32; cinza residual do bagaço de cana (CBC); areia natural lavada; e água proveniente da rede pública. Para os diversos ensaios foi utilizada a fração do material passante na peneira de abertura 0,075 mm (#200).

Segundo Freitas (2005), a alteração da granulometria pelos diversos tempos de moagem produziram diferenças significativas nas resistências mecânicas das argamassas. Esta alteração na granulometria da CBC proporcionou uma maior superfície de contato dos grãos de CBC, aumentando, assim, a reatividade do material e também favoreceu o efeito fíler ocasionado pelo quartzo moído.

A pesquisa de Paula (2006) consistiu em estudar as CBC produzidas dentro de controles de temperatura e tempo de queima utilizando-se uma mufla com controlador, cujo objetivo foi homogeneização da amostra, redução considerável na quantidade de carbono e aumento da quantidade de sílica amorfa. A CBC passou por 11 horas de 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%. Após preparadas as CBC prosseguiu-se os ensaios de resistência à compressão nas idades de 7 e 28 dias, com substituições de cimento pela CBC em 0%, 10%, 20% e 30%. Foram utilizados: cimento CPV ARI PLUS; areia normal em frações individuais: 1,2 mm (peneiras 16); 0,6 mm (peneira 30); 0,3 mm (peneira 50); e 0,15 mm (peneira 100); e água. Paula (2006) verificou que o ganho de resistência inicial foi maior aos 7 dias, devido ao tipo de cimento utilizado que atingir altas resistências nos primeiros dias da aplicação. 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.

No estudo de Cordeiro (2006) foram estudadas a viabilidade da utilização de cinzas ultrafinas produzidas em diferentes tempos de moagem, sob processos de queima controlada e moagem. Para a confecção de concretos convencionais e de alto desempenho foram escolhidas 4 cinzas com base na atividade pozolânica e no consumo de energia, os teores de substituição do cimento foram de 0, 10, 15, 20 e 40%. Os resultados das cinzas produzidas em laboratório revelou que a substituição de até 40% do cimento, manteve-se as propriedades reológicas e mecânicas e durabilidade dos concretos.

Souza (2007) coletou cinzas de tanques de decantação. Inicialmente a CBC foi seca em estufa e após resfriada, foram retirados os resíduos maiores e com combustão incompleta utilizando uma peneira 4,2mm, o material passante foi sujeito a moagem durante 5 horas. Foram produzidas argamassas com substituições do cimento por CBC em 0, 10 e 20% e corpos de prova para as idades de 3, 7, 21 e 28 dias. Foram utilizados: cimento CP II F 32; sílica ativa em pó; areia natural lavada com módulo de finura de 2,29; aditivo químico para

o concreto tipo plastificante à base de lignosulfonatos; e água proveniente da rede pública. Os resultados experimentais comprovaram que o uso de cinzas residuais do bagaço de cana-de-açúcar na produção de argamassas é tecnicamente viável até um teor de substituição de 20% sem perdas nas propriedades mecânicas de resistência à tração e à compressão.

Ganesan *et al.* (2007), substituiu parcialmente o cimento e analisou as propriedades físicas e mecânicas do concreto endurecido. Os materiais utilizados foram cimento Portland, areia lavada com módulo de finura 2,85, brita proveniente de granito do local com módulo de finura 6,26. A cinza foi coletada em caldeira com condições não controladas de temperatura e possuía 11,2% de carbono. Devido a isso a cinza passou por uma nova de 1 hora a temperatura de 650°C reduzindo o carbono para 4,9%. Após o resfriamento da cinza ela foi submetida a uma moagem. Para preparação dos corpos de prova o cimento foi substituído pela cinza em 5, 10, 15, 20, 25 e 30% do peso. As misturas foram homogeneizadas e mantidas em frascos plásticos. O trabalho mostrou que até 20% de cimento Portland comuns podem ser perfeitamente substituída por bem cinzas do bagaço queimado sem qualquer efeito adverso sobre as propriedades desejáveis do concreto. As vantagens específicas de tal substituição foram o desenvolvimento de resistência inicial elevada, a redução da permeabilidade à água e a resistência à penetração de cloreto.

Akram *et al.* (2009) avaliou o uso das cinzas em concretos auto adensáveis. Nesta pesquisa, as principais variáveis são a percentagem de cinzas do bagaço, a dosagem de superplastificante de fluidez e de água / mistura. As adições de cinza ao cimento foram nas taxas de 0, 5, 10, 15 e 20%, o superplastificante foi utilizado nas taxas de 2; 2,5; 3; 3,5 e 4% enquanto que o fator água/mistura foi mantido constante. A fluidez do concreto diminuiu com o aumento da quantidade das cinzas. Os ensaios de compressão indicaram uma diminuição da resistência com o aumento de superplastificante. A resistência a compressão da mistura com 0% de cinza e 2% de superplastificante foi de 37,71 MPa aos 28 dias, as misturas com 15% e 20% de cinza aos 28 dias apresentaram 39,59 e 37,93 MPa, respectivamente. Esse aumento da resistência é devido ao reduzido volume água, ao denso empacotamento de partículas. A mistura com 20% de cinza e 4% de superplastificante, apesar de ter um menor volume de água, obteve a menor resistência, 19,03 MPa em 28 dias.

### 2.5.1 Características das Cinzas

Segundo Cordeiro (2005), as cinzas são constituídas predominantemente por dióxido de silício ( $\text{SiO}_2$ ), esse teor de sílica é considerado desejado quando a sílica e/ou silicato de alumínio encontra-se em estado amorfo, pois ao longo do tempo tem-se reações que formam silicatos de cálcio hidratados, importantes para resistência mecânica de pastas, argamassas e concretos. Os elementos mais comuns encontrados nas cinzas e algumas de suas propriedades físicas são apresentados na Tabela 2.

**Tabela 2 – Propriedades químicas**

**Fonte: HERNÁNDEZ (1998), CORDEIRO (2006), FREITAS (2006), GANESAN (2007) e AKRAM *et al.* (2009)**

Composto	HERNÁNDEZ (1998)	FREITAS (2006)		GANESAN (2007)	AKRAM <i>et al.</i> (2009)
		COAGRO sem calcinar	PARAÍSO sem calcinar		
$\text{SiO}_2$	72,74	65,7	83,1	64,15	62,44
$\text{Al}_2\text{O}_3$	5,26	13,8	5,1	26,7	6,74
$\text{Fe}_2\text{O}_3$	3,92	4,1	2,6	5,8	5,77
CaO	7,99	3,5	1,9	0,8	6,16
$\text{Na}_2\text{O}$	0,84	-	-	0,2	3,15
$\text{K}_2\text{O}$	3,47	8,1	4,5	2,6	6,87
MnO	-	-	-	-	-
$\text{TiO}_2$	0,32	-	-	-	-
MgO	2,78	-	-	0,6	2,97
BaO	-	-	-	-	-
$\text{P}_2\text{O}_5$	1,59	-	-	0,6	-
$\text{SO}_3$	-	2,4	2,1	-	0,72
Perda ao fogo	0,77	1	0,9	4,90	2,58
Carbono Orgânico	7,83	-	-	-	-
Teor de umidade	-	-	-	-	2,6
Peso específico ( $\text{kg/m}^3$ )	-	2210 (Sem calcinação e moagem)	2360 (Sem calcinação e moagem)	1850	2220
Área Específica ( $\text{m}^2/\text{kg}$ )		852,31 (600°C/5h e sem moagem)			
Atividade Pozolânica (mg CaO/g amostra)		406 (600°C/5h e sem moagem)	162 (600°C/5h e sem moagem)		
$D_{50}$ (mm)		0,0147	0,0334		
U (grau de uniformidade)		8,4	7,0		

Kawabata (2008) afirma que a composição química influencia fortemente pelo produto que gerou a cinza, pelo solo e pelo processo de produção da cinza. Um processo de queima ineficiente pode elevar o teor de carbono.

Cordeiro (2006) descreve que a presença de partículas de quartzo ( $\text{SiO}_2$ ) podem ser oriundas da areia que aderida à cana-de-açúcar que não é totalmente retirada durante a etapa de lavagem antes da moagem da cana.

Freitas (2006) verificou que a perda ao fogo está relacionada a combustão das cinzas nas fornalhas, a coloração escura das cinzas evidencia a presença de matéria orgânica resultante da calcinação ineficiente.

Zardo *et al.* (2004) constataram que a atividade pozolânica da cinza é diretamente proporcional a área específica e depende da composição química do material, materiais com estrutura desordenada (amorfa), comparados com os materiais cristalinos, são mais reativos com o hidróxido de cálcio livre presente no cimento Portland hidratado. Zardo *et al.* (2004) determinaram a atividade pozolânica de cinzas pelo método de Chapelle, para os tempos de moagem de 1,5 e 3,0h foram encontrados valores de 58,03 e 68,56 mg/g de CaO respectivamente. Os baixos valores foram atribuídos a cristalinidade do material o que permite o emprego das CBC apenas como enchimento em compósitos à base de cimento Portland curados ao ar. O arranjo predominantemente cristalino dos constituintes da cinza e a presença de quartzo são possivelmente as principais razões da reduzida reatividade química apresentada pelo material Cordeiro (2006).

Com relação a granulometria das cinzas *in natura* Freitas (2006) abaixo de 50% da massa do material tamanho igual a 0,0174, a calcinação do mesmo material promoveu uma quebra das ligações diminuindo o tamanho da estrutura das partículas.

### 3 MATERIAIS E MÉTODOS

---

Neste capítulo expõem-se o estudo efetuado, incluindo a descrição da cinza do bagaço de cana-de-açúcar coletada e a metodologia de pesquisa.

Para atingir os objetivos específicos desta dissertação, adotou-se a seguinte metodologia:

- Coleta de quatro amostras de CBC provenientes de usinas distintas;
- Peneiramento da CBC;
- Caracterização das amostras *in natura*;
- Análises de índice de atividade pozolânica;
- Análise da reologia das pastas de cimento contendo CBC;
- Ensaios de resistência à compressão em corpos-de-prova de concreto contendo CBC;

O estudo laboratorial deste trabalho foi realizado no Departamento de Engenharia Civil da Universidade Estadual de Maringá, cidade de Maringá/PR e no Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo, cidade de São Paulo/PR, onde contou-se com a colaboração dos laboratórios abaixo:

- Laboratório de Materiais de Construção Civil - UEM;
- Laboratório de Mecânica dos Solos - UEM;
- Laboratório de Central de Análises Avançadas de Materiais – Complexo de Centrais de Apoio à Pesquisa (COMCAP) – UEM;
- Laboratório de Saneamento Básico - UEM;
- Laboratório de Engenharia Química - UEM;
- Laboratório de Materiais de Construção Civil - área de Química - Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo

### 3.1 MATERIAIS

#### 3.1.1 Cimento Portland

O aglomerante utilizado foi o cimento Portland CII-F 32.

Para a caracterização deste cimento, fez-se o ensaio de índice de finura conforme NBR 11579:1991, ensaio de tempo de pega e ensaio de resistência à compressão da argamassa de cimento de acordo com a NBR 7215:1996.

O índice de finura do cimento CP II-F 32 e os resultados de tempo de pega e da resistência à compressão estão na Tabela 3.

**Tabela 3 – Caracterização do cimento CII-F 32**

Item de controle	Unidade	Média
Material Retido #200	%	2,22
Início de Pega	Horas	15:09
Fim de Pega	Horas	18:53
Resistência a 3 dias	MPa	20,1
Resistência a 7 dias	MPa	23,8
Resistência aos 28 dias	MPa	32,4

#### 3.1.2 Aditivo químico

Na Tabela 4 são descritas as características do aditivo químico Glenium 51.

**Tabela 4 – Características do aditivo químico**

Glenium 51	
Tipo	Super plastificante
Base química	Policarboxilatos
Forma	Líquido viscoso
Viscosidade	128 ± 30 cps (20°)
Cor	Marrom
Massa específica	1,087 ± 0,02 g/cm <sup>3</sup>

### 3.1.3 Agregado Miúdo

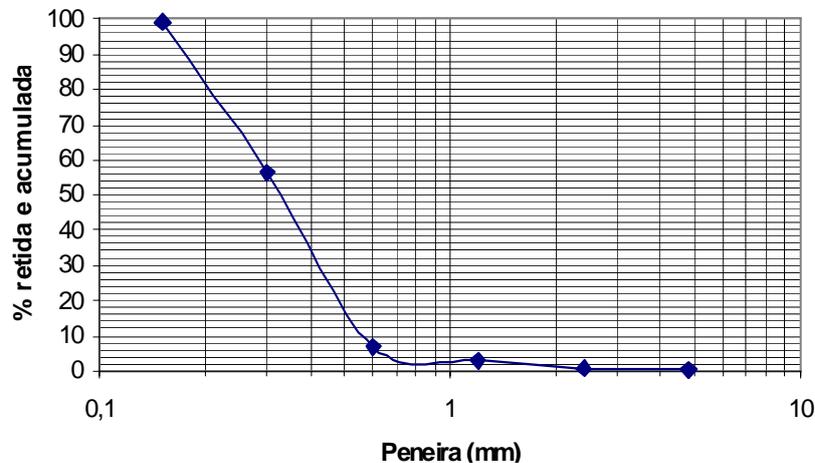
O agregado miúdo utilizado foi a areia de origem quartzosa da região de Maringá - PR cuja caracterização baseou-se nos ensaios descritos nas normas: NM52/2003, NM45/2006; NM248/2003.

Conforme os resultados do ensaio de determinação da composição granulométrica esta pode ser classificada, segundo a NBR 7211/2005, como fina. Além disso, os resultados dos ensaios para determinação da massa específica e da massa unitária no estado solto estão apresentados na Tabela 5.

**Tabela 5 – Caracterização do agregado miúdo**

Característica	Unidade	Valores
Massa específica	kg/dm <sup>3</sup>	2,666
Diâmetro máximo característico	mm	1,2
Módulo de finura	-	1,66
Massa unitária no estado solto	kg/dm <sup>3</sup>	1,572

A curva de distribuição granulométrica encontra-se na Figura 7.



**Figura 7 – Curva de distribuição granulométrica da areia**

### 3.1.4 Agregado Graúdo

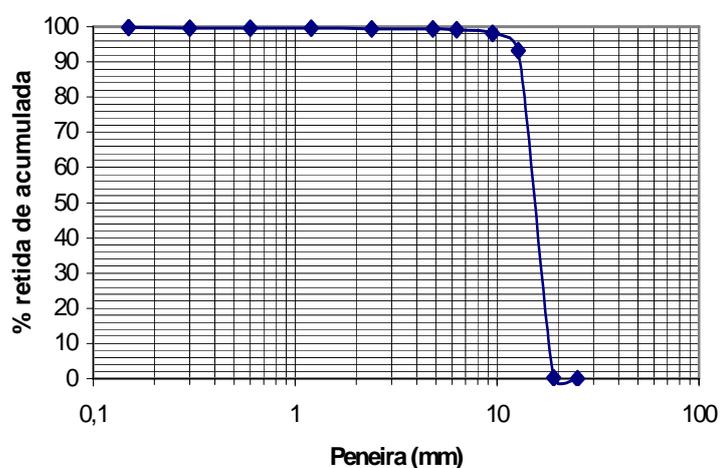
As pedras britadas utilizadas possuem origem basáltica da região de Maringá no Paraná e foram caracterizadas através dos ensaios descritos nas normas: NBR 7810:1983; NM45/2006; NM248/2003; NM 53/2003.

Os resultados dos ensaios encontram-se na Tabela 6.

**Tabela 6 – Caracterização da pedra britada**

<b>Característica</b>	<b>Unidades</b>	<b>Valores</b>
Massa específica na condição seca	kg/dm <sup>3</sup>	2,645
Absorção	%	4,7
Diâmetro máximo característico	mm	19
Módulo de finura	-	6,956
Massa unitária no estado compacto	kg/dm <sup>3</sup>	1,714
Massa unitária no estado solto	kg/dm <sup>3</sup>	1,593

A curva de distribuição granulométrica se encontra na Figura 8.

**Figura 8 – Curva de distribuição granulométrica da pedra britada nº 1.**

### 3.1.5 Água

A água utilizada foi proveniente da rede de abastecimento do município de Maringá.

### 3.1.6 Cinzas

A coleta da cinza foi realizada nos meses de agosto e novembro de 2008 em quatro usinas de álcool localizadas próximas ao município de Maringá, apresentadas na Tabela 7.

Tabela 7 – Detalhes das Usinas escolhidas

Usina	Local	Colheita	Produção	Ponto de coleta da CBC	Período de Coleta
Santa Terezinha	Gleba Chapecó, Lote 246, Distrito Iguatemi - Maringá	Mecanizada / manual	Álcool / açúcar / eletricidade para consumo	Lagoa de decantação	Agosto/2008
Usaçúcar	PR 82, km 308 - Cidade Gaúcha	Mecanizada	Álcool / açúcar / eletricidade para consumo e venda	Lagoa de decantação	Novembro/2008
Santa Terezinha	PR 492, km 47 - Rondon	Mecanizada / manual	Álcool / vapor para consumo	Cinzeiro	Novembro/2008
Santa Terezinha	PR 82, km 82 – São Tomé	Mecanizada / manual	Álcool / vapor para consumo	Cinzeiro	Novembro/2008

As quatro usinas utilizam o bagaço como combustível em processos de produção de co-geração de energia de onde se obtém a cinza residual. Segundo dados das companhias, a temperatura de queima varia conforme o teor de umidade do bagaço, cerca de 500°C a 700°C para 50% de umidade, a queima do bagaço nas caldeiras não ocorre de forma controlada (Figura 9). As usinas de Iguatemi e de Cidade Gaúcha possuem lavadores de cinzas e gases que são transportados até as lagoas de decantação. As cinzas pesadas das usinas de São Tomé e Rondon são retiradas pelos cinzeiros em intervalos de tempos regulares pelo operador, depois de resfriadas elas são encaminhadas a um local próximo a fornalha e depositadas.

A coleta da cinza residual foi realizada entre os meses de agosto e novembro de 2008. Para usina de Iguatemi e Cidade Gaúcha, foram coletadas uma de suas lagoas de decantação cerca de 250 e 50 kg de cinza respectivamente. Para as demais usinas foram coletadas 50 kg de cinzas depositadas próximos as fornalhas, onde se encontravam em temperatura ambiente. As CBC de Iguatemi e Cidade Gaúcha possuíam coloração cinza escura, enquanto que o material de Rondon e São Tomé tinham cor de cinza claro. De acordo com Cordeiro (2006), a coloração é um indicativo do grau de calcinação a que o bagaço foi

submetido, conseqüentemente, do seu teor de carbono. Cinzas escuras indicam um processo de combustão incompleto. Quanto maior a temperatura e/ou tempo de exposição ao calor, maior quantidade de carbono é liberada e a cinza adquire cor que varia entre tons de vermelhos a branco.



**Figura 9: Caldeira da usina de Cidade Gaúcha**

Após a coleta das amostras, estas foram encaminhadas ao laboratório de Materiais de Construção da UEM e secas a sombra durante 2 dias e homogeneizadas em recipientes plásticos. Posteriormente cada amostra foi passada pela peneira com abertura de 0,595mm (malha 30 Mesh). O material retido foi levado a um almofariz e destorroado com um mão de gral revestido com borracha em sua ponta, logo em seguida foi peneirado até que não houvesse material retido ou sobrasse apenas gravetos, folhas, pedras e outros resíduos que não passavam pela malha e considerados como impurezas. Após peneiramento de uma quantidade suficiente para realização dos ensaios, as amostras foram armazenadas em recipientes plásticos hermeticamente vedados. As cinzas *in natura* não foram moídas ou calcinadas.

### **3.2 MÉTODOS**

Devido ao tempo limitado a pesquisa adotou-se a realização dos ensaios de reologia das pastas e resistência de concretos apenas as CBC de Iguatemi, localizada mais próxima a

UEM. Os ensaios de caracterização química e física foram aplicados as quatro cinzas. As amostras não passaram por tratamentos de calcinação e moagem sendo submetidas na sua condição natural uma vez que a intenção do trabalho é focar numa alternativa de baixo custo para utilização das cinzas.

### 3.2.1 Análise granulométrica

A análise granulométrica da CBC foi determinada seguindo a NBR 7181 (1984), por meio da sedimentação (Figura 10a) e do peneiramento fino (Figura 10b, 10c e 10d). A partir dos resultados foram montadas as curvas granulométricas.



(a)



(b)



(c)



(d)

**Figura 10: Análise granulométrica por sedimentação.**

Com as curvas granulométricas pode-se estudar características como o grau de uniformidade e o coeficiente de curvatura para cada amostra.

**Grau de Uniformidade (U):**

Conforme a NBR 6502 (1995) – Rochas e Solos, o grau de uniformidade é definido pela seguinte expressão:

$$U = \frac{D60}{D10} \quad (\text{Eq. 1.0})$$

onde:

“D60” é o diâmetro de partículas correspondente aos 60% mais finos na curva granulométrica [mm],

“D10” é o diâmetro de partículas correspondente aos 10% nesta mesma curva [mm],

O grau de uniformidade, dá uma idéia da variedade de dimensões que as partículas do material possuem, é diretamente proporcional a inclinação da curva granulométrica conforme a expressão acima, quanto maior a inclinação da curva, mais bem graduado é o material, segundo a classificação da NBR 6502 (1995) – Rochas e Solos:

$U < 5$  muito uniforme

$5 < U \leq 15$  uniformidade média

$U > 15$  desuniforme

**Coefficiente de Curvatura (CC):**

Segundo AMARAL (2005), a curva granulométrica entre D60 e D10 pode ser relacionada ao coeficiente de curvatura descrito pela equação 7.

$$CC = \frac{(D30)^2}{D10 \times D60} \quad (\text{Eq. 2.0})$$

onde:

“D30” é o diâmetro de partículas correspondente aos 30% mais finos na curva granulométrica [mm],

Solos bem graduados têm  $1 < CC < 3$ .

### 3.2.2 Massa específica

Para determinar a massa específica da CBC utilizou-se a NBR 6508: 1984, que estabelece o seguinte procedimento:

- 1- pesou a amostra para o ensaio e anotou-se sua massa da amostra (P1);
- 2- colocou-se a massa em um picnômetro (Figura 11a) e completou-se o volume com água (destilada), pesou-se o conjunto picnômetro + amostra + água (P2);
- 3- Esvaziou-se e lavou-se o picnômetro, completou-se o volume com água (destilada) e pesou-se o conjunto picnômetro + água (P3).

A densidade dos grãos da amostra é obtida pela equação 1.

$$\gamma_s = \frac{P_1 / (1 + W)}{[P_1 / (1 + W)] + P_3 - P_2} \gamma_{wt} \quad (\text{Eq. 3.0})$$

onde:

“ $\gamma_s$ ” é a massa específica dos grãos do solo [g/cm<sup>3</sup>],

“ $P_1$ ” é a massa da amostra úmida [g],

“ $W$ ” é a umidade da amostra [%],

“ $P_2$ ” é a massa do picnômetro + amostra + água [g],

“ $P_3$ ” é a massa do picnômetro + água [g],

“ $\gamma_{wt}$ ” é a massa específico da água [g/cm<sup>3</sup>].

Alguns detalhes foram interessantes nesse ensaio, para as cinzas, o grande problema para a precisão do resultado é a presença de bolhas de ar, na água ou no interior. Para que a determinação da densidade seja acurada, foi necessário tirar todo o ar, pois este tem densidade desprezível (0,0012) em relação à água (1,000), então o volume ocupado pelas bolhas falsifica as pesagens. Além de fazer a aeração do picnômetro por um tempo maior, foi realizado o banho maria (Figura 11b) prevista na pela norma para remover as bolhas de ar no interior do picnômetro.



(a)

(b)

**Figura 11: Ensaio de densidade com o picnômetro**

### 3.2.3 Área Específica

A área específica do material é a relação entre a área superficial da partícula e o seu volume (NEVILLE, 1997). O material foi encaminhado ao Laboratório de Engenharia Química da UEM onde a determinação das áreas superficiais e volumes dos poros é realizada pelo método de Adsorção/Dessorção de N<sub>2</sub>, em um equipamento Nova 1200 Series da QuantaChrome, os resultados são analisados no Programa Autosorb 1 da Quantachrome. Os parâmetros texturais são determinados a partir das isotermas de adsorção de N<sub>2</sub> obtidas. Antes da análise, as amostras são submetidas a um pré-tratamento, sendo ativadas a 300 °C, sob vácuo, durante 3 horas, para garantir a secagem completa. A adsorção e a dessorção de nitrogênio é realizadas a temperatura do N<sub>2</sub> líquido (-196 °C). A área superficial específica é determinada pelo método BET, enquanto os dados de área e volume de mesoporos e distribuição dos tamanhos de poros são obtidos por meio do método BJH.

### 3.2.4 Teor de umidade, matéria orgânica e carbono orgânico

Essas quatro propriedades são encontradas em conjunto e tomou-se como referência os métodos citados em Kiehl (1985) e foram repetidas para as amostras das quatro usinas.

### Teor de umidade

Primeiramente pesou-se uma cápsula seca e obteve-se P1. Em seguida, pesou-se uma porção de amostra, obtendo-se P2. A cápsula contendo a amostra foi levada à estufa, graduada para a faixa de 100 – 110°C, permanecendo por 24 horas. Deixou o conjunto amostra e cápsula esfriar no dessecador por 30 minutos, pesou-se e obteve-se P3.

$$Umidade(\%) = \frac{(P_2 - P_3) \times 100}{(P_2 - P_1)} \quad (\text{Eq. 4.0})$$

onde:

“*Umidade*” é o teor de umidade do material [%],

“*P*<sub>1</sub>” é a massa da cápsula seca [g],

“*P*<sub>2</sub>” é a massa da amostra com umidade natural [g],

“*P*<sub>3</sub>” é a massa da amostra + cápsula seca em estufa por 24 h na faixa de 100-110°C [g].

Este ensaio foi feito na determinação da massa específica seguindo a norma NBR 6508: 1984.

### Matéria Orgânica Total

Levou-se a cápsula com o material da análise do teor de umidade à mufla, mantendo a porta entre-aberta para proporcionar adequada aeração; a amostra deve ser aquecida lentamente para ser queimada sem inflamar, pois, se formar labareda poderá ocorrer perda de material; recomendando-se, nesse caso, que a determinação seja repetida. Fechada a porta e alcançada a temperatura de 550°C, manteve-se nessa temperatura por mais uma hora, em seguida, retirou-se a cápsula da múfla e a resfriou em dessecado, sendo pesada na sequência P<sub>4</sub>.

$$MO_{total}(\%) = \frac{(P_3 - P_4) \times 100}{(P_3 - P_1)} \quad (\text{Eq. 5.0})$$

onde:

“*MO*<sub>total</sub>” é a matéria orgânica total [%],

“*P*<sub>1</sub>” é a massa da cápsula seca [g],

“*P*<sub>2</sub>” é a massa da amostra com umidade natural [g],

“ $P_3$ ” é a massa da amostra + cápsula seca em estufa por 24 h na faixa de 100-110°C [g].

“ $P_4$ ” é a massa da amostra + cápsula seca em mufla por 1h na faixa de 550°C [g].

### **Carbono Orgânico:**

A determinação do teor de carbono orgânico é feita dividindo-se o resultado da matéria orgânica total pelo fator 1,8. KIEHL (1985)

$$C_{orgânico} (\%) = \frac{MO_{total} (\%)}{1,8} \quad (\text{Eq. 7.0})$$

onde:

“ $C_{orgânico}$ ” é o carbono orgânico [%],

“ $MO_{total}$ ” é a matéria orgânica total [%],

### **3.2.5 Atividade pozolânica**

A análise da atividade pozolânica foi realizada pela área de química do laboratório de Materiais de Construção do IPT-SP. Para sua determinação foi utilizado o método de Chappelle modificado por Raverdy *et al.* (1980). Segundo Cordeiro (2006) este método é possui uma formulação teórica consistente e de execução rápida.

O ensaio consiste em colocar 1 g de CaO, 1g do material supostamente pozolânico e 250ml de água isenta de CO<sub>2</sub> dentro de um frasco e agitá-lo em banho-maria por aproximadamente 16 horas. O quantidade em mg de CaO reagida com 1g do material corresponde ao valor da atividade pozolânica.

Segundo RAVERDY *et al.* (1980 *apud* CORDEIRO, 2006) o valor de consumo de CaO igual a 330 mg/g é admitido como mínimo necessário para o material apresentar atividade pozolânica considerável, pois este valor obtido baseia-se na diferença entre os valores de resistência à compressão aos 180 dias de cimentos com e sem pozolana.

### 3.2.6 Difração de Raios-X

Este ensaio permite a identificação dos minerais, presentes nas cinzas do bagaço de cana, em relação as suas cristalinidades. O ensaio foi realizado em um difratômetro da marca Shimadzu, modelo D6000, com fonte de Cu 40Kv e 30 mA, filtro de Níquel, num sistema completamente computadorizado, operando a 40 kV e 30 mA. As amostras foram trituradas com gral e pistilo de porcelana (Figura 12a) e passados na peneira 0,075mm (#200). Em seguida foram preparadas lâminas para serem submetidas às análises (Figura 12b).



Figura 12: Pistilo, gral e lâminas (a); Difratômetro (b)

### 3.2.7 Reologia entre Cimento e CBC

O estudo da reologia entre o cimento e a CBC foi realizado com o desenvolvimento do projeto de Iniciação Científica intitulado “Estudo do comportamento reológico da pasta de cimento com adição de cinza do bagaço da cana-de-açúcar e aditivo químico superplastificante” desenvolvido pela acadêmica de engenharia civil Cíntia Maria Pedroso.

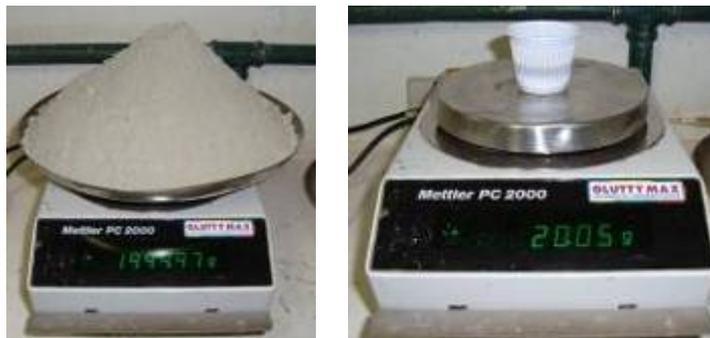
Neste ensaio foi empregada a cinza do bagaço de cana-de-açúcar da usina de Iguatemi.

Para analisar a reologia entre a CBC e o cimento Portland, adotou-se como parâmetro a ser estudado a viscosidade da pasta contendo CBC pelo método do funil de Marsh.

Este método consiste em preparar uma pasta e medir quanto tempo é gasto para o escoamento de certa quantidade de pasta por um funil de determinado diâmetro. Os cones usados podem ter características geométricas diferentes e o diâmetro do funil pode variar de 5 mm a 12,5 mm.

O funil utilizado nesta pesquisa, possuía diâmetro de 22mm, fazendo-se necessário alguns ajustes. Inicialmente foi estabelecido um traço padrão feito por tentativas até que se encontrou a relação água/cimento (a/c) que se ajustou aos valores que foram sugeridos por Aïtcin (2000) para um funil de diâmetro igual a 5 mm.

Com o auxílio da balança digital pesou-se 2000g de cimento CII-F-32, Figura 13a, com a proveta mediu-se o volume 770ml de água, com ajuda da pipeta manipulou-se o superplastificante Glenium 51 até um recipiente e pesou-se 20g do mesmo, Figura 13b, ou seja, pasta com 1% de superplastificante, essa relação a/c foi de 0,35.



(a) Cimento

(b) Superplastificante

**Figura 13 – Pesagem dos matérias: (a) cimento, (b) superplastificante**

Em seguida, foi levado o cimento ao misturador e, aos poucos, acrescentou-se água e superplastificante, agitando por 5 minutos, Figura 14. Após, levou-se a pasta até o funil de Marsh adaptado, onde escoou-se 1 litro da pasta medida em um becker, mediu-se o tempo de escoamento, Figura 15. Com a ajuda de uma espátula, a pasta retornou ao misturador, onde ficou em repouso até a próxima medida. E assim, mediu-se o tempo de escoamento pelo funil nos intervalos 15 min, 25 min, 35 min, 45 min e 60 min.



**Figura 14 – Misturador para preparação da pasta**



**Figura 15 – Funil de Marsh adaptado**

Notou-se que o tempo de escoamento para o intervalo de 5 minutos foi de 10s, inferior ao previsto que deveria ser igual ou superior a 20s. Dessa forma foram feitas outras tentativas até que se chegou ao teor a/c de 0,28, que correspondeu a 2000g de cimento e 560ml de água.

Foi tomada como referência a pasta padrão que não tem cinzas, como descrito acima, a partir da qual se promoveu uma redução da quantidade de cimento e conseqüente introdução de CBC na taxa de 5%. Para o traço padrão e contendo 5% e 10% de CBC, foi analisado o comportamento reológico das pastas variando a quantidade de superplastificante nas taxas de 0,4%, 0,6%, 0,8%, 1,2% e 1,4% em relação a quantidade de cimento.

### 3.2.8 Propriedades Mecânicas do Concreto feitos com CBC

O estudo das propriedades mecânicas do concreto, com substituição parcial do cimento pela CBC, foi realizado com o desenvolvimento do projeto de Iniciação Científica intitulado “Estudo das Propriedades Mecânicas do Concreto com Adição da Cinza do Bagaço da Cana-de-Açúcar” desenvolvido pelos acadêmicos de engenharia civil Maicon Secchi e Marcelo Akira Pietrobom Abe. Para este ensaio foi utilizada a cinza do bagaço da cana-de-açúcar da usina de Iguatemi.

Para avaliar as propriedades mecânicas do concreto feito com CBC, foi estabelecida a seguinte metodologia de trabalho:

- Seleção e caracterização dos materiais;
- Definição do traço de referência em (1,000 : 2,060 : 2,940 : 0,555);
- Taxas de CBC de 3%, 5%, 7%, 10%, 13%, 15% e 20% em substituição a massa de cimento do traço de referência;
- Concretagem de corpos-de-prova cilíndrico de 10cm x 20cm;
- Cura dos corpos-de-prova;
- Ensaio à compressão axial dos corpos-de-prova nas idades: 3, 7, 14 e 28 dias;

Foram preparados um total de 96 corpos de prova. A quantia máxima para substituição de cimento por CBC adotada foi de 20%, essa taxa foi escolhida por verificar que havia uma tendência na queda da resistência a partir de 15% de substituição e principalmente pelo tempo disponível para a pesquisa.

#### 3.2.8.1 Programa Experimental

Para análise do efeito da fração da cinza do bagaço da cana-de-açúcar em substituição a determinados teores de cimento Portland na produção de concretos foram moldados corpos-de-prova cilíndricos (10 x 20cm) e ensaiados à compressão axial, conforme programa experimental mostrado na Tabela 8.

**Tabela 8 – Programa experimental**

Série	% de CBC	Nº de CP ensaiados à compressão axial			
		Idade dos CP's			
		3 dias	7 dias	14 dias	28 dias
1	0% (Referência)	3	3	3	3
2	3%	3	3	3	3
3	5%	3	3	3	3
4	7%	3	3	3	3
5	10%	3	3	3	3
6	13%	3	3	3	3
7	15%	3	3	3	3
8	20%	3	3	3	3

### 3.2.8.2 Concretagem dos Corpos-de-prova

Após a caracterização granulométrica dos agregados e da CBC, iniciou-se o processo de dosagem, realizando-se em um primeiro instante a dosagem do traço de referência.

Pesou-se as massas de agregado miúdo e graúdo a serem utilizadas com auxílio de uma balança de capacidade de 150,0 Kg, ilustrada na Figura 16a. Logo em seguida, procedeu-se da mesma maneira com relação à determinação da massa de Cimento Portland.

Providenciou-se a água necessária para a mistura dos materiais, através de uma proveta, indicada na Figura 16b. Na seqüência, realizou-se a mistura dos componentes em uma betoneira de eixo inclinado com capacidade de 40,0 litros, apresentada na Figura 16c.



(a) Balança digital



(b) Proveta de 100ml



(c) Betoneira de 40l

**Figura 16 – Equipamentos utilizados**

Retirou-se o concreto da betoneira, sendo parte dele separado para a determinação da consistência do concreto pelo abatimento do tronco de cone (Slump Test), conforme prescreve a NM 67/1998.

Em seguida transferiu-se esse concreto para um carro-de-mão para assim dar início à moldagem dos corpos-de-prova, como apresentado na Figuras 17.

A moldagem desses modelos foi feita como proposto na NBR 5738:1994. Feito isso, os modelos foram deixados em repouso no próprio local por 24 horas. Passado esse período providenciou-se a retirada dos moldes. A cura dos corpos-de-prova foi realizada em câmara úmida, onde permaneceram até o momento do ensaio de resistência à compressão simples.



**Figura 17 – Moldagem dos corpos-de-prova**

### 3.2.8.3 Ensaio de Resistência à Compressão

Os ensaios mecânicos foram realizados em uma prensa hidráulica de capacidade de carga de 100 toneladas, como mostrado na Figura 18. Esses ensaios foram realizados nas idades de 3, 7, 14 e 28 dias de cura do concreto.



**Figura 18 – Prensa hidráulica de 100 toneladas**

## 4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Neste capítulo expõem-se o estudo efetuado, incluindo a descrição da cinza do bagaço de cana-de-açúcar coletada e a metodologia de pesquisa. Com exceção dos ensaios de reologia e resistência a compressão, todos os ensaios foram realizados utilizando as amostras produzidas pelas quatro usinas.

### 4.1 CARACTERIZAÇÃO QUÍMICA E FÍSICA

#### 4.1.1 Matéria Orgânica e Carbono Orgânico

A Tabela 9 apresenta algumas propriedades químicas da CBC. Foi realizado o ensaio com três amostras e obteve-se a média.

Tabela 9 – Teor de umidade, matéria orgânica total e carbono orgânico

Amostra	Iguatemi			Cid. Gaúcha			Rondon			São Tomé		
	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3
<b>Teor de Umidade (%)</b>	1,39	0,61	0,84	1,02	1,19	1,78	0,16	0,22	0,12	0,21	0,13	0,12
	0,95			1,33			0,17			0,15		
<b>Mat. Orgânica Total (%)</b>	3,82	3,04	3,79	4,13	4,38	7,4	1,42	1,38	1,3	1,35	1,38	1,31
	3,55			5,3			1,36			1,35		
<b>Carbono Orgânico (%)</b>	2,12	1,69	2,11	2,3	95,57	92,46	98,58	98,62	98,7	98,65	98,62	98,69
	1,97			2,95			0,76			0,75		

Na preparação das amostras observou-se a presença de uma camada de cinza de coloração preta sobre o restante do material, após a permanência do material na mufla, notou-se que a camada superficial tornou-se clara (Figura 19b).

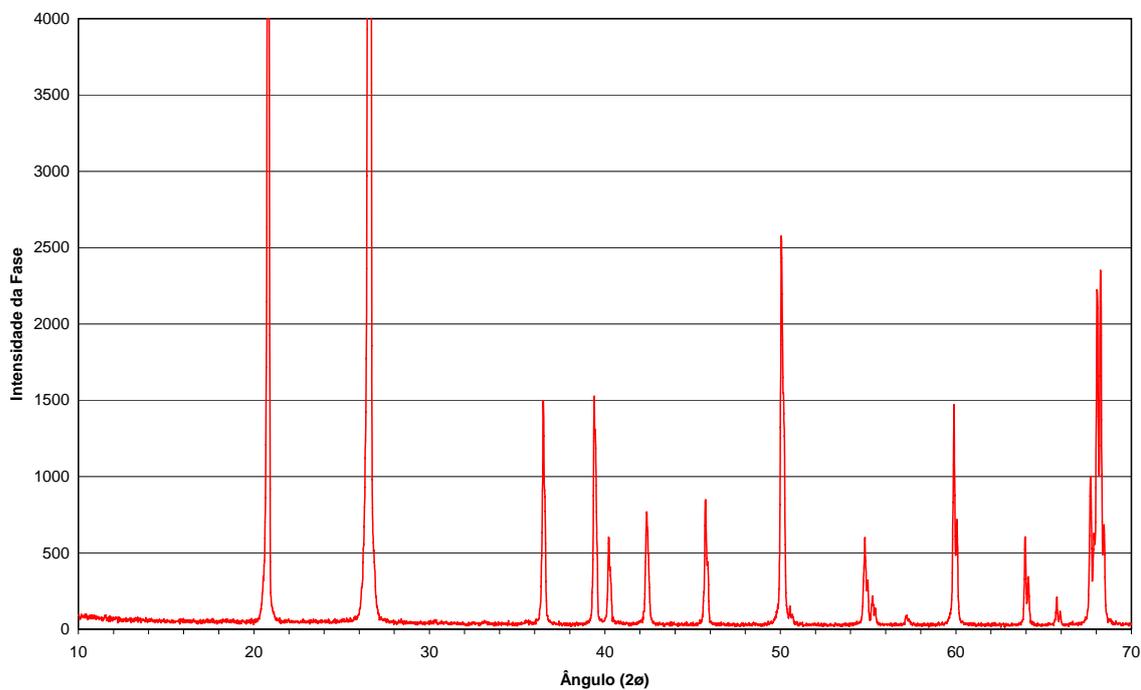
Segundo COOK (1986 *apud* PAULA, 2006), a presença de até aproximadamente 20% de carbono na cinza não afeta significativamente a resistência à compressão.



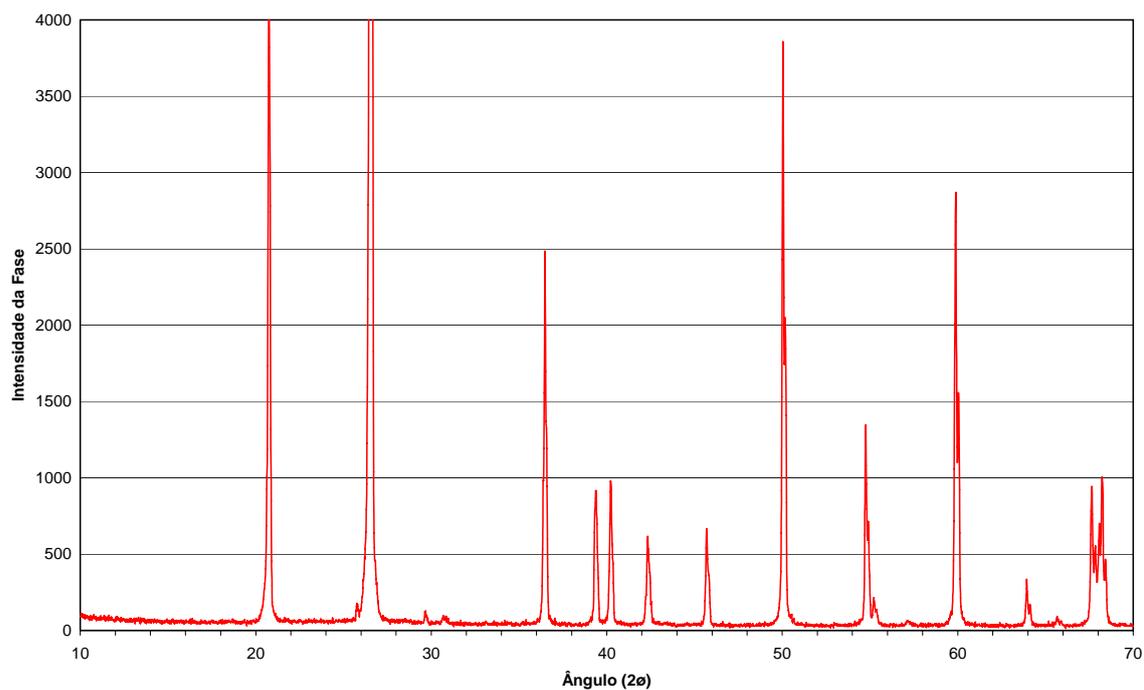
**Figura 19 – Amostras após permanecerem por 1 hora a 550°C em mufla**

### 4.1.2 Difração de Raios-X

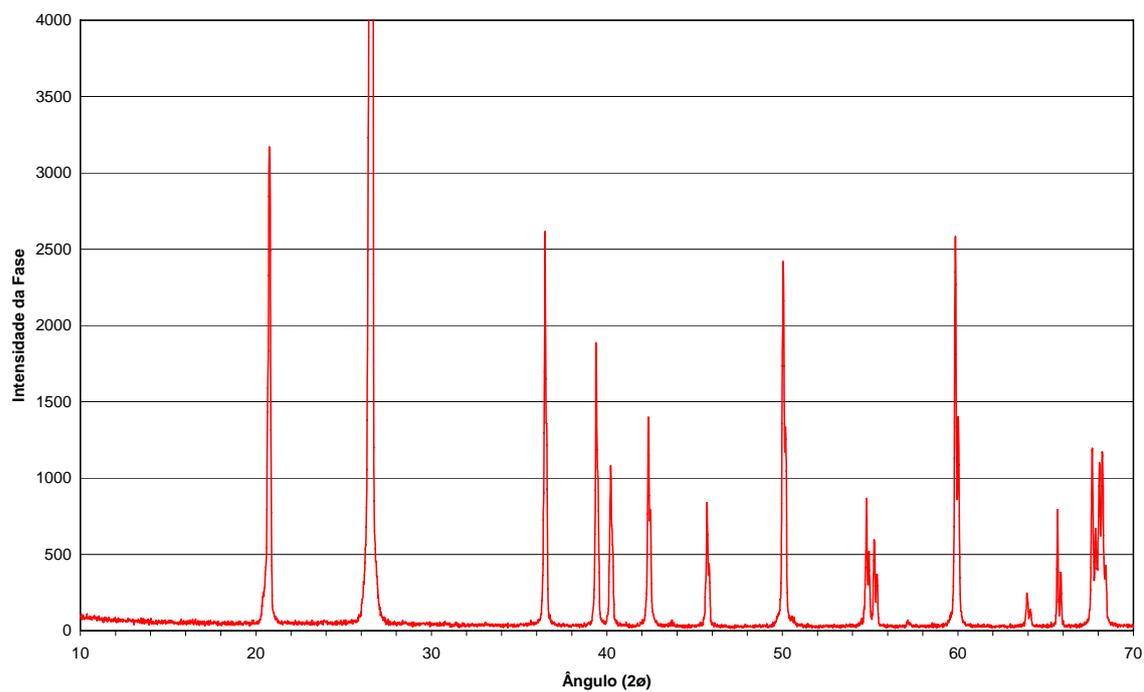
As Figuras 20, 21, 22 e 23 mostram o difratograma de raios-X das cinzas do bagaço de cana-de-açúcar estudado. Observa-se nestas figuras que não existem fases amorfas bem definidas visto que os backgrounds são razoavelmente retilíneos e sem a curvatura característica de materiais amorfos.



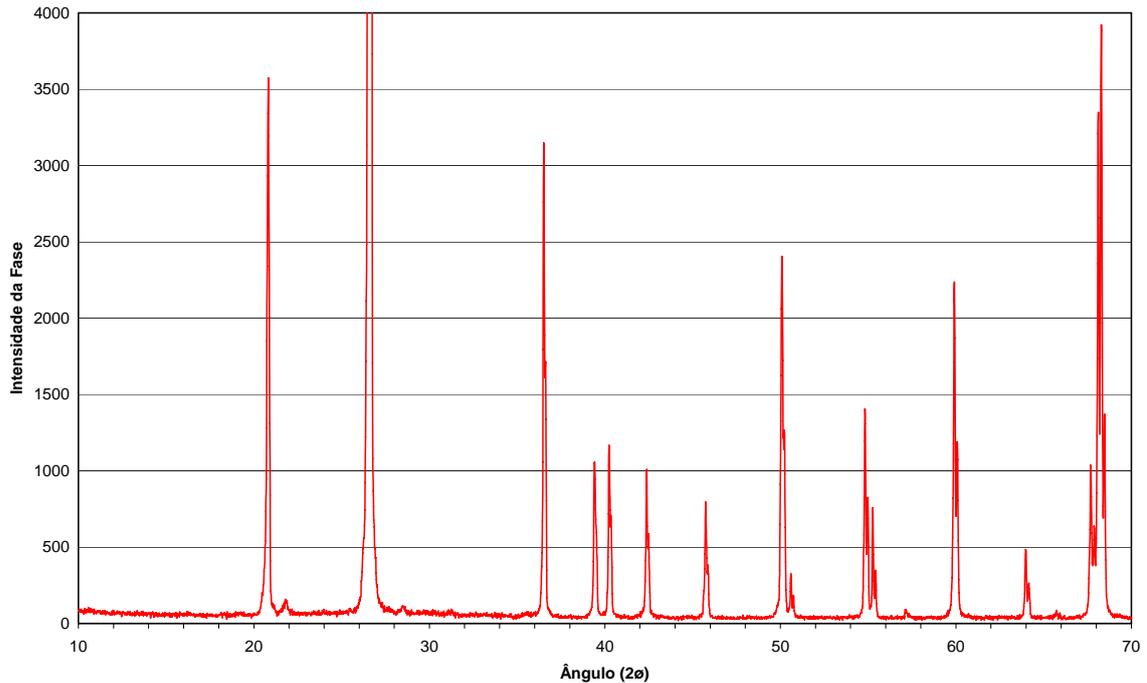
**Figura 20 – DR-X – Iguatemi**



**Figura 21 – DR-X – Cidade Gaúcha**



**Figura 22 – DR-X – Rondon**



**Figura 23 – DR-X – São Tomé**

A identificação dos minerais foi realizada por comparação com os padrões de difração JCPDS-ICCD – International Centre for Diffraction Data (1996), ela revelou a presença de uma fase altamente cristalina na forma de quartzo ( $\text{SiO}_2$ ), demais minerais não foram registrados pelo equipamento. Ambientalmente apresenta-se como um material inerte e sem risco ambiental.

Cordeiro (2006) descreveu que a presença de partículas de quartzo provavelmente são da areia que se encontra aderida à cana-de-açúcar que não é totalmente retirada durante a etapa de lavagem antes da moagem da cana. FREITAS (2005) e CORNEIRO (2009) afirmam que a presença de fases cristalinas reduzem a atividade pozolânica. Para a utilização desse material, visando melhorar suas propriedades pozolânicas, FREITAS (2005) expõe que é necessária a transformação da sílica cristalina em sílica amorfa, que é mais reativa, processo que pode ser obtido por meio da calcinação.

#### **4.1.3 Atividade Pozolânica**

A atividade pozolânica demonstrou-se bem abaixo do valor mínimo de 330 mg CaO/g pozolana citado na publicação do ensaio Chapelle por Raverdy *et al.* (1980). A Tabela 10 mostra os resultados obtidos no ensaio de Chapelle modificado, o baixo índice de atividade

pozolânica. Segundo Kawabata (2008) a sua reatividade depende da composição química, fortemente influenciada pelo produto que gerou a cinza, pelo solo, pelo processo de produção da cinza.

**Tabela 10 – Índice de atividade pozolanica**

Amostra	Iguatemi	Cidade Gaúcha	Rondon	São Tomé
mg CaO/g material	23	25	28	48

#### 4.1.4 Área Específica

Na Tabela 11 encontram-se as áreas específicas das cinzas.

**Tabela 11 – Área Específica**

Amostra	Iguatemi	Cidade Gaúcha	Rondon	São Tomé
Área específica m <sup>2</sup> /Kg	5356	18120	3462	4203

#### 4.1.5 Massa específica e Teor de umidade

Para a massa específica (Tabela 12) seguiu-se a metodologia da NBR 6508 (1984) – Grãos de solo que passam na peneira 4,8mm, ensaio realizado através do picnômetro. O teor de umidade, já foi identificado anteriormente juntamente com a matéria orgânica pelo método descrito por Kiel (1985), entretanto para este item foi apresentado a Tabela 11 com novos resultados, pois trata-se de um ensaio relativamente rápido e simples além da determinação da umidade já fazer parte do ensaio de massa específica.

**Tabela 12 – Massa específica**

Amostra	n°	Iguatemi		Cidade Gaúcha		Rondon		São Tomé	
		1	2	1	2	1	2	1	2
Capacidade do Picnômetro (ml)		500	500	500	500	500	500	500	500
Amostra Úmida (g)	P1	60	60	60	60	60	60	60	60
Amostra Seca (g)		60	60	60	60	60	60	60	60
Picnômetro + Solo + Água (g)	P2	678,7	672,8	644	691,8	679,1	695,8	695,3	657,7
Picnômetro + água	P3	641,55	635,82	607,35	655	641,9	658,5	658,26	620,45
Massa Específica dos grãos (médio) (g/cm <sup>3</sup> )	g <sub>s</sub> (médio)	2,61		2,57		2,61		2,61	

Os valores da massa específica das cinzas ficaram muito próximos do valor da areia utilizada neste trabalho com 2,66 g/cm<sup>3</sup>.

**Tabela 13 – Teor de umidade**

Cápsula n°	Iguatemi			Cidade Gaúcha			Rondon			São Tomé		
	35	7	18	2	21	14	11	3	22	13	4	1
Amostra úmida + cápsula (g)	118,74	117,3	122,37	127,13	106,37	115,7	120,52	138,03	140,13	114,51	109,46	120,24
Amostra seca + cápsula (g)	118,12	116,71	121,72	126,21	105,58	114,89	120,36	137,79	139,91	114,37	109,34	120,1
Massa da cápsula (g)	24,83	25,01	29,03	27,9	26,77	24,83	25,69	25,57	25,11	23,42	25,64	25,4
Teor de umidade (%)	0,66	0,64	0,7	0,94	1	0,9	0,17	0,21	0,19	0,15	0,14	0,15
Teor de umidade médio (%)	0,67			0,95			0,19			0,15		

#### 4.1.6 Análise Granulométrica

Esta análise foi realizada pela combinação entre peneiramento e sedimentação seguindo a seguiu-se a metodologia da NBR 7181 (1984) – Solo – Análise Granulométrica. A amostra passante na peneira 0,595mm (#50) obtiveram resultados semelhantes para as curvas granulométricas obtidas pelo ensaio da sedimentação de partículas da CBC.

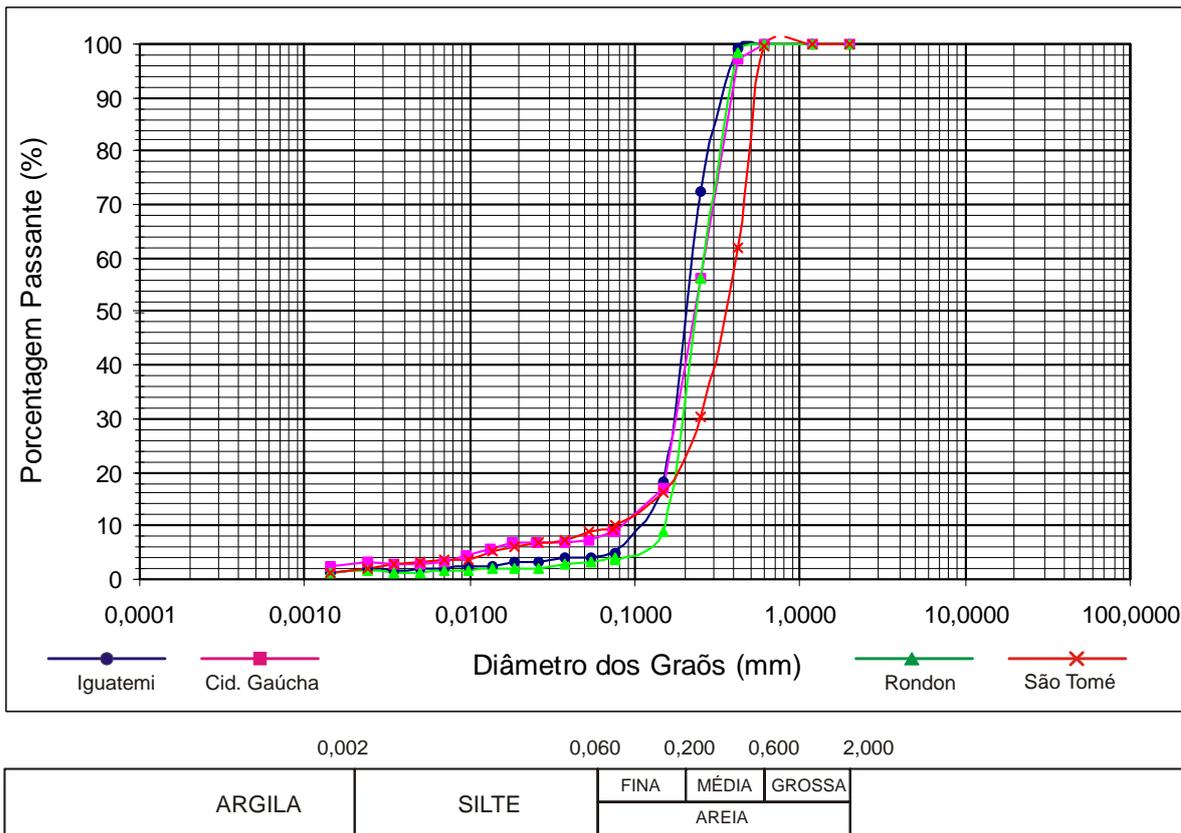


Figura 24 - Curvas granulométricas

Tabela 14 – Porcentagem passante (%)

Diâmetro dos grãos (mm)	Amostras			
	Iguatemi	Cidade Gaúcha	Rondon	São Tomé
2	100%	100%	100%	100%
0,6	100%	100%	100%	100%
0,2	50%	40%	34%	23%
0,06	4%	8%	4%	9%
0,002	2%	3%	2%	2%

**Tabela 15 – Porcentagem retida - classificação granulométrica NBR 6502/1995**

Classificação segundo a NBR 6502/1995	Amostras			
	Iguatemi	Cidade Gaúcha	Rondon	São Tomé
0,6 a 2 mm (areia grossa)	0%	0%	0%	0%
0,2 a ,6 mm (areia média)	50%	60%	66%	77%
0,06 a 0,2 mm (areia fina)	46%	32%	30%	14%
0,002 a 0,06 mm (silte)	2%	5%	2%	7%
≤ 0,002 mm (argila)	2%	3%	2%	2%

**Tabela 16 – Coeficientes de uniformidade e curvatura**

Coeficiente	Amostras			
	Iguatemi	Cidade Gaúcha	Rondon	São Tomé
D60	0,21	0,26	0,24	0,41
D30	0,18	0,19	0,19	0,25
D10	0,11	0,09	0,15	0,075
U	1,909	2,889	1,6	5,467
CC	1,403	1,543	1,003	2,033

**Tabela 17 – Uniformidade e distribuição granulométrica**

Aspecto	Amostras			
	Iguatemi	Cidade Gaúcha	Rondon	São Tomé
Uniformidade	muito uniforme	muito uniforme	muito uniforme	uniformidade média
Distribuição granulométrica	bem graduada	bem graduada	bem graduada	bem graduada

Observando as curvas granulométricas e a Tabela 14 verifica-se que mais de 50% das cinzas ficaram retidas na peneira 0,200 mm, na classificação da NBR 6502/1995 elas são semelhantes as areias médias. As amostras de Rondon, Iguatemi e Cidade Gaúcha apresentaram os valores de uniformidade mais próximos a 1 (Tabela 17) indicando uma curva granulométrica quase vertical, pelo gráfico verifica-se que os diâmetros variam em um intervalo pequeno. A amostra de São Tomé o abatimento da curva granulométrica ocorreu num intervalo de variação de diâmetros maiores.

Todas as amostras apresentaram boa graduação (Tabela 16 e 17), com valor do coeficiente de distribuição granulométrica entre 1 e 3. A distribuição proporcional do tamanho das partículas significa que os espaços deixados pelas partículas maiores são ocupados pelas menores.

#### 4.1.7 Reologia entre o Cimento e a CBC

Aplicando o método do funil de Marsh, mediu-se o tempo de escoamento de um litro de pasta pelo funil nos intervalos de 5 min, 15 min, 25 min, 35 min, 45 min e 60 min após a mistura do cimento e sílica ativa com a água para os teores de superplastificante nas taxas de 0,4%, 0,6%, 0,8%, 1,2% e 1,4% em relação a quantidade de cimento.

Com essas informações, foram elaboradas curvas para cada tempo do intervalo entre 5min. e 60min, para o traço padrão e para o traço com 5%, 10%, 15% e 20% de CBC (usina de Iguatemi) em substituição à massa de cimento. Os gráficos estão apresentados nas Figuras 25, 26, 27, 28 e 29.

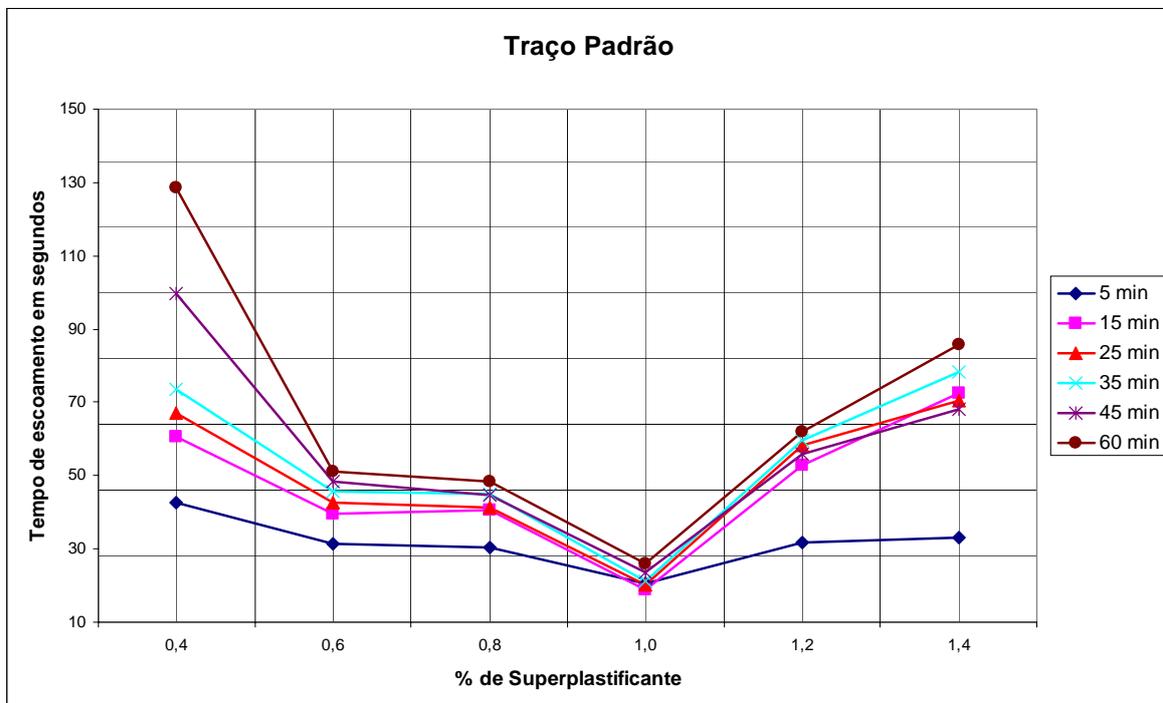


Figura 25 – Viscosidade da pasta do traço padrão

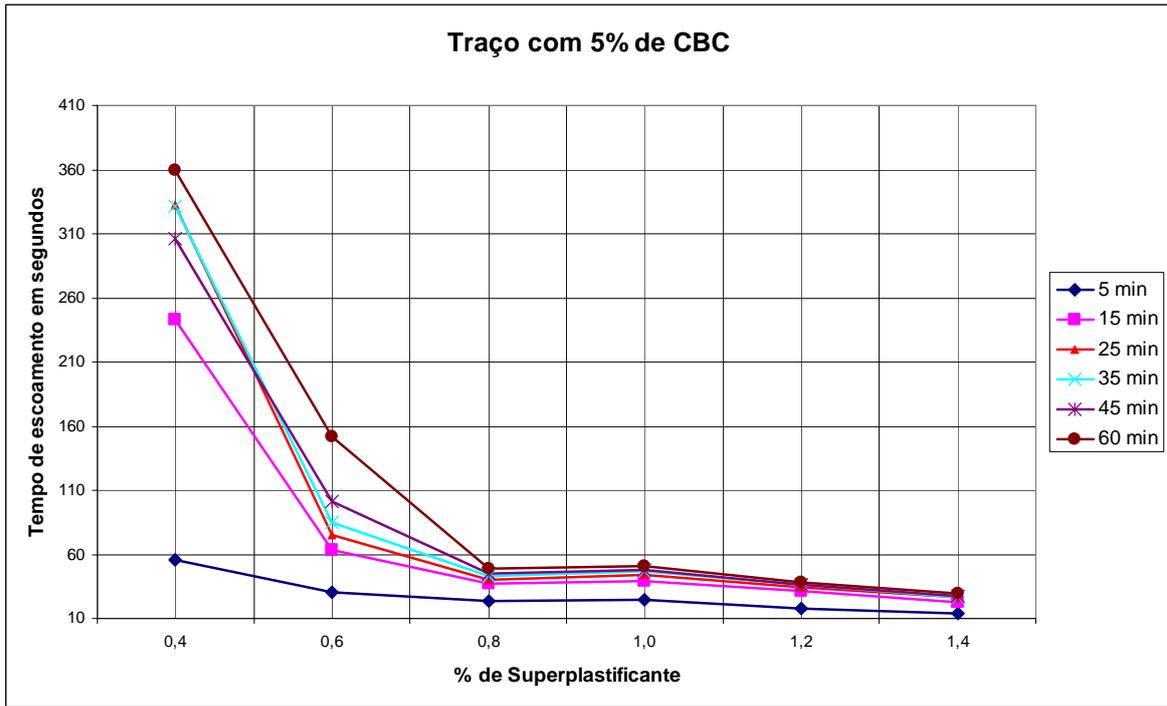


Figura 26 – Viscosidade da pasta com 5% de CBC

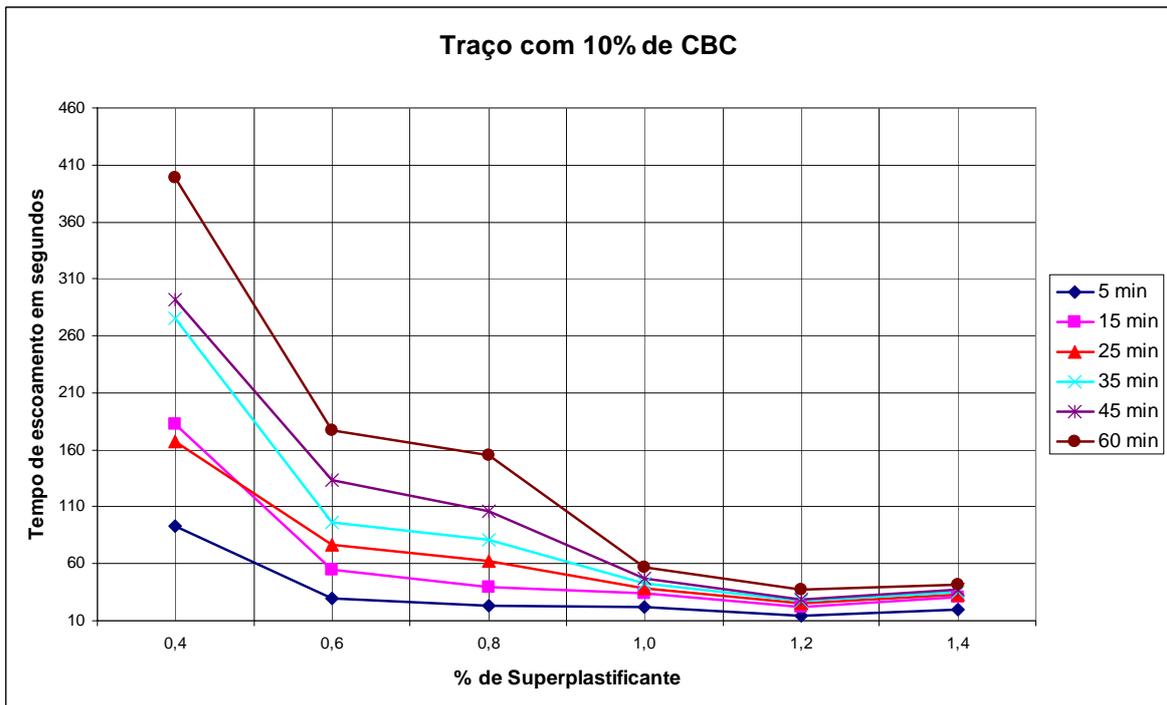


Figura 27 – Viscosidade da pasta com 10% de CBC

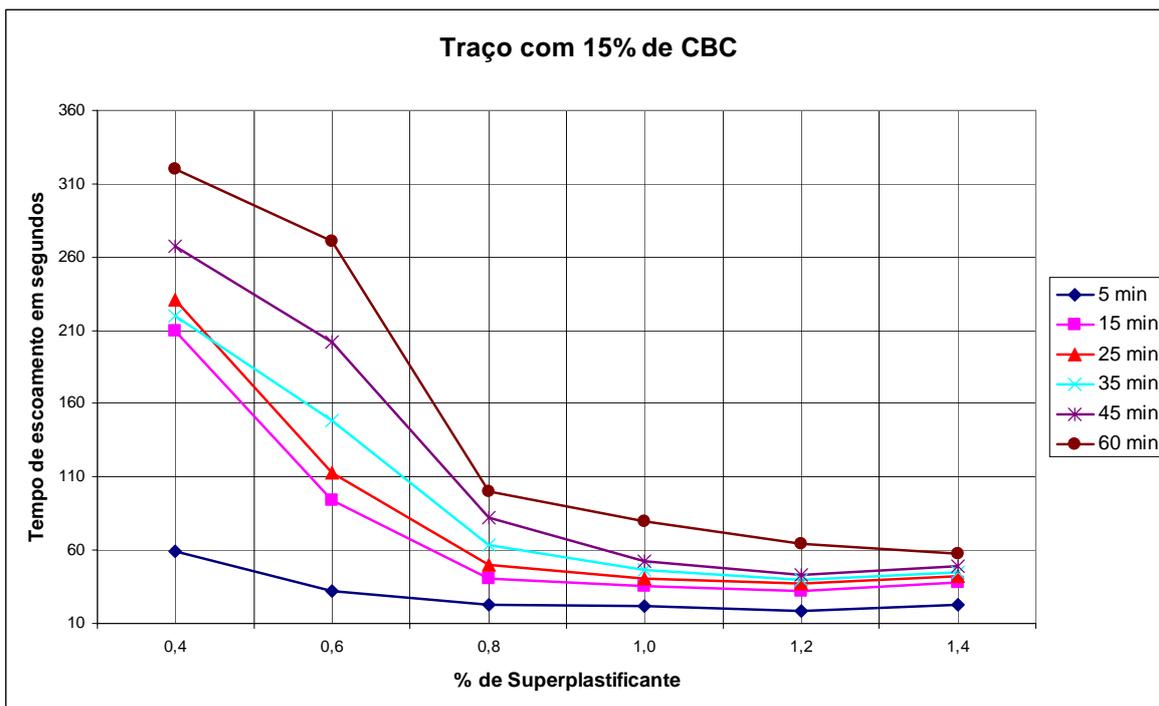


Figura 28 – Viscosidade da pasta com 15% de CBC

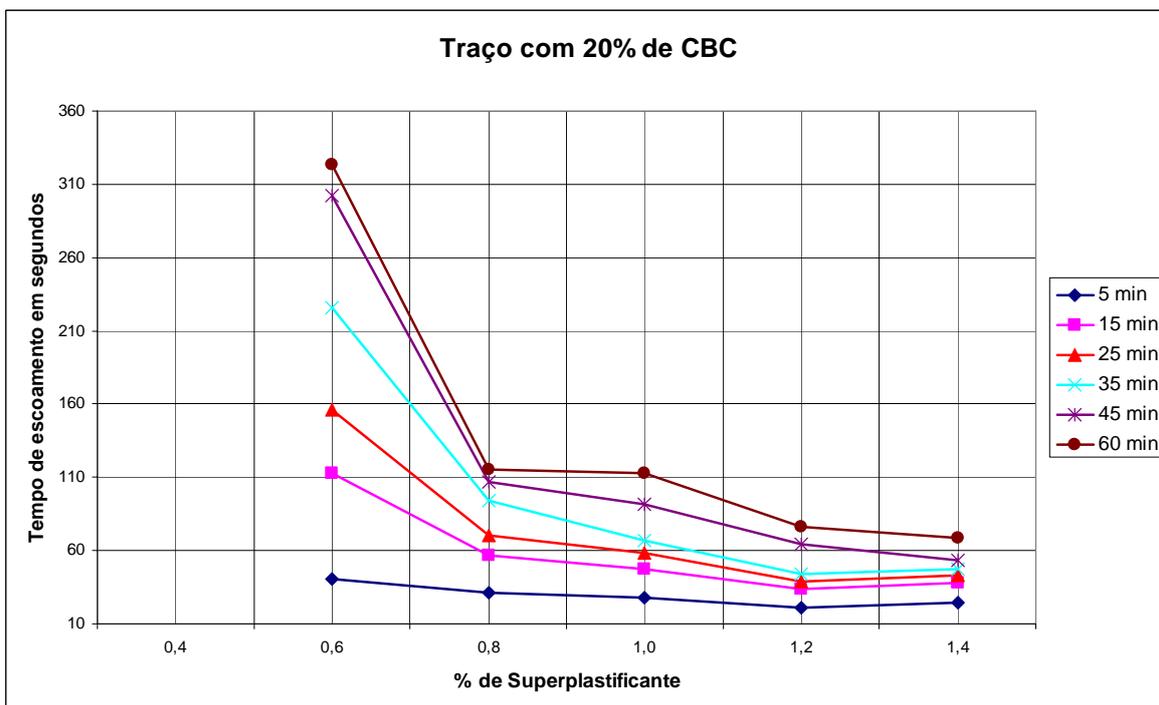


Figura 29 – Viscosidade da pasta com 20% de CBC

AÏTCIN (2000) descreve o ponto de saturação onde, nas condições experimentais usadas para medir o tempo de escoamento, qualquer aumento na dosagem do superplastificante não produz nenhum efeito na reologia da pasta.

Analisando as Figuras 25, 26, 27 e 29, seguindo o conceito de AÏTCIN (2000), pode-se concluir que o ponto de saturação da pasta do traço analisados são os mostrados na Tabela 18.

**Tabela 18 – Ponto de saturação**

<b>Traços % CBC</b>	<b>Ponto de Saturação % Superplastificante</b>
0% Padrão	1,00%
5%	1,40%
10%	1,20%
15%	1,20%
20%	1,20%

Com os resultados apresentados, observa-se que a cinza do bagaço da cana-de-açúcar apresentou alteração no comportamento reológico da pasta, necessitando de uma quantidade maior de aditivo químico para atingir o ponto de saturação.

#### **4.1.8 Propriedades Mecânicas dos Concretos feitos com CBC**

O traço adotado para o estudo das propriedades mecânicas foi com base na proporção 1 : 2,06 : 2,94 : 0,52 (cimento : areia : brita : água). Primeiramente foi realizado um traço de referência, com 0% de CBC (usina de Iguatemi), chamado de “padrão”, para os demais traços, o cimento foi substituído proporcionalmente conforme indicado na Tabela 19.

A trabalhabilidade do concreto diminuiu conforme houve um acréscimo de cinza

**Tabela 19 – Taxas de substituição de cimento pela CBC**

Traço	Massa Espec. kg/m <sup>3</sup>	a/c	Consumo cimento kg/m <sup>3</sup>	Slump Teste (cm)
<b>Padrão</b>	2194,3	0,52	366,25	7
<b>3%</b>	2171,1	0,52	366,25	10,5
<b>5%</b>	2188,5	0,62	353,35	7,5
<b>7%</b>	2206	0,60	356,07	6,5
<b>10%</b>	2182,7	0,62	353,65	8,5
<b>13%</b>	2153,6	0,62	353,65	6
<b>15%</b>	2176,9	0,67	347,74	5,5
<b>20%</b>	2171,1	0,65	349,49	5

Os valores experimentais obtidos nos ensaios de resistência à compressão simples estão na Tabelas 20.

**Tabela 20 – Resistência a compressão simples**

% de CBC	$f_c$ (MPa)			
	Idade dos CP's			
	3 dias	7 dias	14 dias	28 dias
0% (Referência)	17,2	21,9	29,9	32,8
3%	24,0	27,6	32,1	33,0.
5%	25,3	28,5	35,3	33,6
7%	20,3	24,6	28,0	35,4
10%	22,0	28,8	30,5	34,6
13%	21,6	26,4	29,6	34,8
15%	24,2	24,2	24,3	27,6
20%	18,3	24,2	23,4	23,5

A Figura 30 mostra a representação gráfica indicando a evolução da resistência à compressão ao longo do tempo, para cada teor de CBC adicionados.

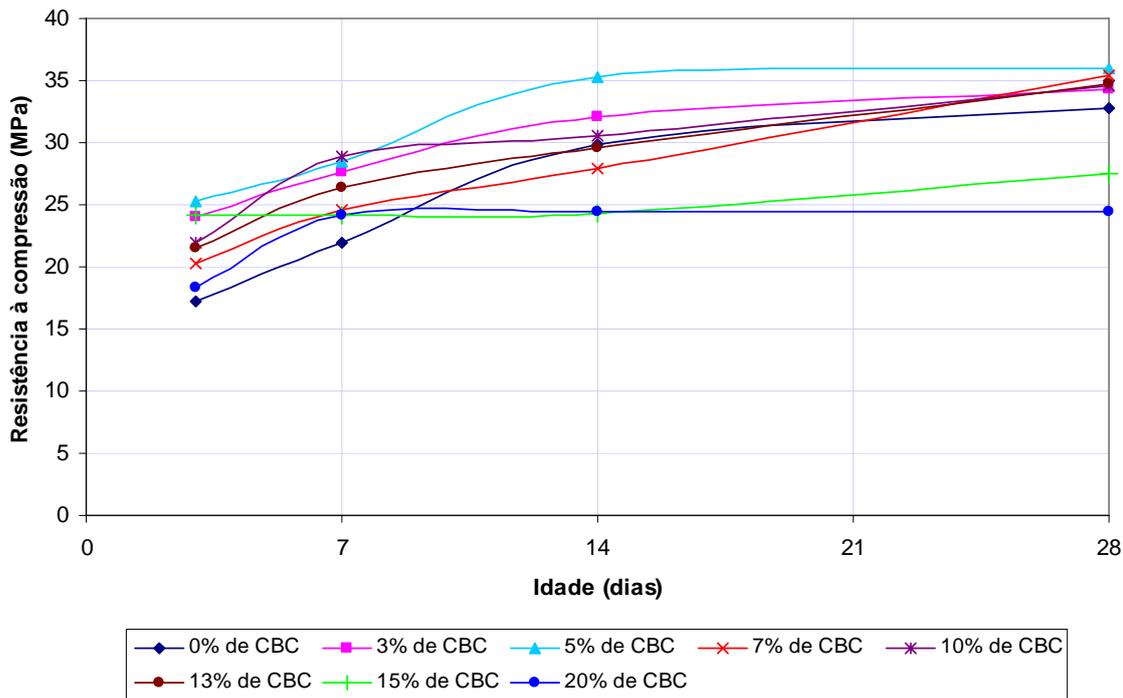


Figura 30 – Comportamento das resistências nas dosagens propostas ao longo do tempo

Na Figura 31 mostra a variação da resistência à compressão em função do teor de CBC adicionada, para as idades de 3, 7, 14 e 28 dias.

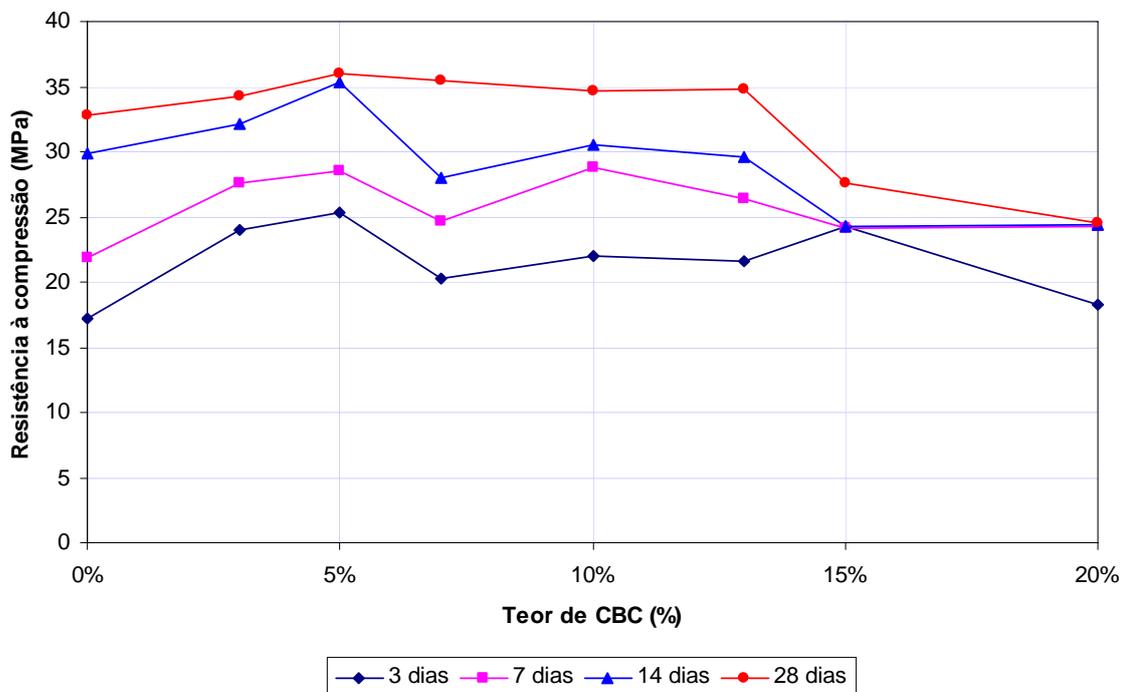


Figura 31 – Comportamento das resistências para 3, 7 e 28 dias em função dos teores de CBC

A Tabela 21 apresenta um comparativo percentual das resistências entre os corpos-de-prova ensaiados com adição de CBC, em relação aos valores alcançados pelo traço de referência.

**Tabela 21 – Variação da resistência a compressão**

Idade (dias)	$f_c$ Referência	Variação da resistência em relação ao traço de referência						
		3% CBC	5% CBC	7% CBC	10% CBC	13% CBC	15% CBC	20% CBC
3	17,20	39,53	47,09	18,02	27,91	25,58	40,70	6,40
7	21,90	26,03	30,14	12,33	31,51	20,55	10,50	10,50
14	29,90	7,36	18,06	-6,35	2,01	-1,00	-18,73	-21,74
28	32,80	0,61	2,44	7,93	5,49	6,10	-15,85	-28,35

De acordo com os resultados experimentais, observa-se que aos 28 dias de cura do concreto, a CBC promove um acréscimo de 0,6% a 8% na sua resistência à compressão quando substitui até 7% da massa de cimento por CBC. Perceber-se também que os maiores acréscimos na resistência à compressão ocorreram após 3 dias de cura para a substituição de 5% e 15% da massa de cimento por CBC, a partir da substituição de 15% ocorreu um decréscimo na resistência, após os 14 dias de cura, comparada com o traço de referência.

Esses resultados traduzem de forma bastante clara a afirmação de FREITAS (2005), de que a velocidade de reação pozolânica a partir da utilização de cinzas advindas da queima do bagaço da cana-de-açúcar é extremamente lenta, sobretudo quando não se promove uma moagem eficiente.

## 5 CONCLUSÃO

---

Com base nos resultados dos estudos realizados, nota-se que o material tem pouca variabilidade, a maior parte das CBC vinda das usinas passam pela peneira #50 desde que sejam destorroadas, a passagem pela peneira retira o material orgânico como as fibras vegetais não queimadas e também os grãos de carvão presentes. Apesar de realizado o peneiramento, também constatou-se que há pouca diferença na presença de carbono entre as amostras. A cinza da cana estudada é produzida em fornos sem controle de temperatura, cinzas formadas por combustão não controlada em fornos industriais, fato também constatado no trabalho de Anjos (2008). Cinzas geradas sem controle de temperatura geralmente contém grandes proporções de minerais de sílica não reativos, devendo ser moídos a tamanhos de partículas muito finas para desenvolver atividade pozolânica Mehta e **MEHTA & Monteiro** (1995 *apud* ANJOS, 2008).

A realização do ensaio de reologia ocorreu para estudar a pasta ligante, pois esta controla as propriedades reológicas do concreto fresco. Os resultados dos ensaios comprovaram que a substituição parcial do cimento pela cinza influenciou o comportamento reológico das pastas e a ação do plastificante não se restringe ao cimento. A argamassa padrão com 0% de cinza teve um ponto de saturação com 1% de plastificante e manteve o tempo de escoamento pelo funil abaixo de 30 segundos para todos os tempos de misturas. Para a substituição de 5% do cimento pela cinza o ponto de saturação foi de 1,4% de plastificante e o tempo manteve-se abaixo de 30 segundos para todos os tempos de misturas. Para as substituições 10, 15 e 20% verificou-se que o ponto de saturação manteve-se em 1,2% e o tempo de escoamento elevou-se um pouco mantendo-se abaixo de 60 segundos. Com base nesses resultados constatou-se que quantidade de superplastificante utilizado deve ser considerada a quantidade total de cimento e cinza e que a fluidez diminuiu ao longo do tempo com o aumento do teor de substituição de cimento pela cinza.

As cinzas apresentaram uma elevada concentração de sílica ( $\text{SiO}_2$ ) cristalina na forma de quartzo, que tem influência direta nos baixos índices de atividade pozolânica, dependendo da quantia de cimento substituída pode diminuir a resistência do concreto.

A substituição de até 13% de cimento pelas cinzas produziu um ganho considerável na resistência, onde a taxa de 7% produziu a maior resistência. Acima desses valores houve uma queda na resistência do concreto após 28 dias. O ganho de resistência nas primeiras

idades também foi relevante, pode ser explicado devido ao preenchimento do espaço entre as partículas grossas por partículas finas.

É importante deixar claro que os dados apresentados neste trabalho referem-se apenas as amostras coletadas, e foram passadas apenas por um peneiramento e ainda necessitam de mais estudos para conclusões mais completas. Podem ser executados outros trabalhos visando a modificação física ou química das cinzas como a calcinação e a moagem e assim melhorar suas propriedades e ampliar a utilização. O reaproveitamento desses resíduos é importante para o fechando a cadeia produtiva, certamente o maior ganho será o ambiental.

## 6 REFERÊNCIAS

---

AKRAM, T.; MEMON, S.A.; OBAID, H. **Production of low cost self compacting concrete using bagasse ash. Construction and building materials.** 2009. Construction and Building Materials, Vol. 23, 703-712.

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.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5753.** Cimento Portland pozolânico - determinação da pozolanicidade. Rio de Janeiro, 1992.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5738.** Moldagem e cura de corpos-de-prova de concreto cilíndricos ou prismáticos - procedimento. Rio de Janeiro, 1994.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6502.** Rochas e Solos. Rio de Janeiro, 1995.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6508:** massa específica dos solos. Rio de Janeiro, 1984.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7181:** análise granulométrica. Rio de Janeiro, 1984.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7211.** Agregados para concreto – especificação. Rio de Janeiro, 2005.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7810.** Agregado em estado compactado e seco - determinação da massa unitária. Rio de Janeiro, 1983.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR NM 45.** Agregados – Determinação da massa unitária e do volume de vazios, 2006.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR NM 52 -** Agregado miúdo - Determinação de massa específica e massa específica aparente. Rio de Janeiro, 2003

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR NM 53.** Agregado graúdo – determinação de massa específica, massa específica aparente e absorção de água. Rio de Janeiro, 2003.

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

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR NM 76.** Cimento Portland - Determinação da finura pelo método de permeabilidade ao ar (Método de Blaine). Rio de Janeiro, 1998.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR NM 248**. Agregados – Determinação da composição granulométrica. Rio de Janeiro, 2003.

Associação dos Produtores de Bioenergia do Estado do Paraná (ALCOPAR). Disponível em: <http://www.alcopar.org.br>. Acesso em: 01/11/2008.

ALCOPAR – Associação de Produtores de Bioenergia do Estado do Paraná – **Relatório de Gestão da Indústria Sucroalcooleira do Paraná – 2007**. Disponível em: <http://www.alcopar.org.br/relatorios/relatorios.php>. Acesso em: 01/11/2008.

AMARAL, Frank Cabral de Freitas. **Previsão da Capacidade de Suporte de Areias Médias e Finas Uniformes em Obras Viárias com o Emprego do Ensaio DCP**. Dissertação de Mestrado. Instituto Tecnológico de Aeronáutica, ITA, São José dos Campos, 2005.

ANJOS, M. A. S; MARTINELLI, A. E. **Caracterização do resíduo da biomassa da cana-de-açúcar para aplicação em pastas cimentícias**. 2008. In: 18º Congresso Brasileiro de Engenharia e Ciência dos Materiais – CBECiMat. Anais...Porto de Galinhas, Brasil. Disponível em: [http://www.cbecimat.com.br/Trab\\_Completos/113-050.doc](http://www.cbecimat.com.br/Trab_Completos/113-050.doc). Acesso em: 03/03/2009.

AÏTCIN, P. C. **Concreto de alto desempenho**. São Paulo: Ed. Pini, 2000. 662 p.

COELHO, S. T. **Mecanismos para Implementação da Cogeração de Eletricidade a partir de Biomassa, Um modelo para o Estado de São Paulo**. Tese de Doutorado. Universidade de São Paulo, 1999.

CAMELO, D.; SILVA, G. N.; et al. **Contribuição ao estudo de aproveitamento da cinza da casca da castanha-do-pará como material pozolânico**. 2005. In: 47º Congresso Brasileiro do Concreto – IBRACON. Anais... Olinda, Brasil : IBRACON. CD-ROM.

CONAB – Companhia Nacional de Abastecimento – **Acompanhamento da Safra Brasileira de Cana-de-açúcar – Safra 2008 – Segundo Levantamento**. Agosto/2008. Disponível em: <http://www.conab.gov.br>. Acesso em: 01/11/2008.

CORDEIRO, G. C.; TOLEDO FILHO, R. D.; FAIRBAIRN, E. M. **Avaliação da reatividade da cinza residual do bagaço de cana de açúcar com cimento Portland e cal**. 2005. In: 47º Congresso Brasileiro do Concreto – IBRACON. Anais... Olinda, Brasil: IBRACON. CD- ROM.

CORDEIRO, G. C.. **Utilização de cinzas ultrafinas do bagaço de cana-de-açúcar e da casca de arroz como aditivos minerais em concreto**. Tese de Doutorado. COPPE/Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2006.

CORDEIRO, G.C.; FILHO, R. D. T.; FAIRBAIRN, E. M. R. **Caracterização de Cinza do Bagaço de Cana-de-açúcar para Emprego como Pozolana em Materiais Cimentícios**. 2009. Revista Química Nova, Vol. 32, nº 1 , 82-86.

DIAS, R. V.; SECCHI, M.; ABE, M. A. P. **Estudo das Propriedades Mecânicas do Concreto com Adição da Cinza do Bagaço da Cana-de-Açúcar**. 2008. Projeto de

Iniciação Científica. Universidade Estadual de Maringá – UEM. Departamento de Engenharia Civil.

DIAS, R. V.; PEDROSO, C. M. Estudo do **comportamento reológico da pasta de cimento com adição de cinza do bagaço da cana-de-açúcar e aditivo químico superplastificante**. 2008. Projeto de Iniciação Científica. Universidade Estadual de Maringá – UEM. Departamento de Engenharia Civil.

EMBRAPA. Agência de Informação da Embrapa. Cana-de-açúcar. **Correção e adubação**. Disponível em: <http://www.agencia.cnptia.embrapa.br/>. Acesso em: 02/03/2009.

FIESP/CIESP. **Ampliação da oferta de energia através da biomassa**. São Paulo: 2001. Disponível em: [http://www.fiesp.com.br/publicacoes/pdf/ambiente/relatorio\\_dma.pdf](http://www.fiesp.com.br/publicacoes/pdf/ambiente/relatorio_dma.pdf). Acesso em: 02/03/2009.

FREITAS, E. de S. **Caracterização da cinza do bagaço da cana-de-açúcar do município de campos dos Goytacazes para uso na construção civil**. Dissertação de Mestrado. Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro, UENF, Rio de Janeiro, 2005.

GANESAN, K.; RAJAGOPAL, K.; THANGAVEL, K.. **Evaluation of bagasse ash as supplementary cementitious material**. 2007. Cement & Concrete Composites, Vol. 29, 515-524.

JCPDS-ICDD – International Centre for Diffraction Data (1993).

KAWABATA, C.Y.. **Aproveitamento de cinzas da queima de resíduos agroindustriais na produção de compósitos fibrosos e concreto leve para a construção rural**. Tese de Doutorado. Universidade de São Paulo, Pirassununga, 2008.

KIEHL, J. E. **Fertilizantes Orgânicos**. 1 ed. Piracicaba: Editora Agronômica Ceres Ltda, 492p. 1985.

KORNDÖRFER, G. H., DATNOFF, L. E. 1995. **Adubação com silício: uma alternativa no controle de doenças da cana-de-açúcar e do arroz**. Informações Agronômicas. Piracicaba. 70:1-5. Jun/1995.

LIMA, C. C. **Caracterização química de resíduos da produção de biodiesel compostados com adição mineral**. Tese Doutorado. Universidade Federal de Viçosa, UFV, Minas Gerais, 2006.

NEVILLE, A. M.. **Propriedades do concreto**. Tradução Eng. Salvador E. Giammusso, 2ª Edição, Editora Pini, São Paulo, 1997.

NITA, C., JOHN, V. M.. **Materiais pozolânicos: o metacaulim e a sílica ativa**. In: Boletim Técnico da Escola Politécnica da USP. EPUSP, 2007. 13 p. Departamento de Engenharia de Construção Civil.

MEHTA, P. K.. **Reducing the Environmental Impact of Concrete**. 2001 Disponível em: <http://www.ecosmartconcrete.com>. Acesso em: 01/04/2009.

Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento. Disponível em: <http://www.agricultura.gov.br/>. Acesso em: 01/04/2009.

OLIVEIRA, J.G.. **Perspectivas para a cogeração com bagaço de cana-de-açúcar: potencial do mercado de carbono para o setor sucro-alcooleiro paulista**. Dissertação Mestrado. Universidade de São Paulo, USP, São Carlos, 2007.

PAULA, M. O. **Potencial da cinza do bagaço da cana-de-açúcar como material de substituição parcial de cimento Portland**. Dissertação Mestrado. Universidade Federal de Viçosa, UFV, Minas Gerais, 2006.

RAVERDY, M., BRIVOT, F., PAILLÈRE, A. M., DRON, R. “**Appréciation de l’activité pouzzolanique des constituants secondaires**” - 7e. Congrès International de la Chimie des Ciments Volume III, 36. Paris 1980;

SANTOS, J.R.; ABREU, N.R.; BALDANZA, R.F.. **O impacto do marketing verde nas indústrias sucroalcooleiras de Alagoas**. In: Revista Econômica do Nordeste, v.40, n.2. 2009.

SOUZA, G. N; FORMAGINI, S.; CUSTÓDIO, F. O.; SILVEIRA, M. M. **Desenvolvimento de Argamassas com Substituição Parcial do Cimento Portland por Cinzas Residuais do Bagaço de Cana-de-açúcar**. 2007. In: 49º Congresso Brasileiro do Concreto – IBRACON. Anais... Bento Gonçalves, Brasil: IBRACON. CD- ROM.

TÉCHNE (2008) - "**Entrevista – Concreto Sustentável**", pág. 24-28 – Edição 129 – Outubro - 2008.

União da Indústria de Cana-de-açúcar (Única). Disponível em: [www.unica.com.br](http://www.unica.com.br). Acesso em: 01/11/2008.

WREGEL, M. S.; CAROMORI, P. H.; GONÇALVES, A. C. A.; BERTONHA, A.; FERREIRA, R. C.; CAVIGLIONE, J. H.; FARIA, R. T.; FREITAS, P. S. L.; GONÇALVES, S. L. **Regiões potenciais para cultivo da cana-de-açúcar no Paraná, com base na análise do risco de geadas**. 2005. In: Revista Brasileira de Agrometeorologia, Santa Maria, v.13, n.1, p. 113-122, 2005.

ZARDO, A. M.; BEZERRA, E. M.; MARTELLO, L. S.; SAVASTANO JR.,H.. **Utilização da cinza de bagaço cana-de-açúcar como “filler” em compostos de fibrocimento**. 2004. In: I Conferência Latino-americana de Construção Sustentável, X Encontro Nacional de Tecnologia do Ambiente Construído. São Paulo, Brasil.