

Universidade Federal do Rio de Janeiro

**AVALIAÇÃO DA UTILIZAÇÃO DA CINZA DO BAGAÇO DE CANA-DE-AÇÚCAR EM CONCRETO USANDO CONSTRUÇÕES RESIDENCIAIS DE MENOR IMPACTO**

Thiago da Cruz Sessa

2013



Universidade Federal  
do Rio de Janeiro  
Escola Politécnica

**AVALIAÇÃO DA UTILIZAÇÃO DA CINZA DO BAGAÇO DE CANA-DE-AÇÚCAR EM CONCRETO USANDO CONSTRUÇÕES RESIDENCIAIS DE MENOR IMPACTO**

Thiago da Cruz Sessa

Projeto de Graduação apresentado ao Curso de Engenharia Civil da Escola Politécnica, Universidade Federal do Rio de Janeiro, como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Engenheiro.

Orientador(es): Elaine Garrido Vazquez  
Marcos Martinez Silvoso

Rio de Janeiro  
Abril, 2013

AVALIAÇÃO DA UTILIZAÇÃO DA CINZA DO BAGAÇO DE CANA-DE-AÇÚCAR EM CONCRETO USANDO CONSTRUÇÕES RESIDENCIAIS DE  
MENOR IMPACTO

Thiago da Cruz Sessa

PROJETO DE GRADUAÇÃO SUBMETIDO AO CORPO DOCENTE DO CURSO DE ENGENHARIA CIVIL DA ESCOLA POLITÉCNICA DA UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE JANEIRO COMO PARTE DOS REQUISITOS NECESSÁRIOS PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE ENGENHEIRO CIVIL.

Examinada por:

---

Prof. Elaine Garrido Vazquez, D.Sc.

---

Prof. Marcos Martinez Silvoso, D.Sc.

---

Prof. Ana Catarina Jorge Evangelista, D.Sc.

RIO DE JANEIRO, RJ – BRASIL

Abril de 2013

**AVALIAÇÃO DA UTILIZAÇÃO DA CINZA DO BAGAÇO DE CANA-DE-AÇÚCAR EM CONCRETO USANDO CONSTRUÇÕES RESIDENCIAIS DE MENOR IMPACTO**

Sessa, Thiago da Cruz

Avaliação da utilização da cinza do bagaço de cana-de-açúcar em concreto usando construções residenciais de menor impacto / Thiago da Cruz Sessa. – Rio de Janeiro: UFRJ/ Escola Politécnica, 2013.

IX, 89 p.: il.; 29,7 cm.

Orientadores: Elaine Garrido Vazquez e Marcos Martinez Silvoso

Projeto de Graduação – UFRJ/ Escola Politécnica/ Curso de Engenharia Civil, 2013.

Referências Bibliográficas: p72-80.

1. Introdução.
  2. Revisão Bibliográfica.
  3. Materiais e Métodos.
  4. Apresentação e Análise dos Resultados.
  5. Exemplo de Estimativa de Emissão de CO<sub>2</sub> em Edificação Residencial
  6. Considerações Finais.
- I. Vazquez, Elaine Garrido, et al. II. Universidade Federal do Rio de Janeiro, Escola Politécnica, Curso de Engenharia Civil. III. Título.

## AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus por tudo.

Agradeço aos meus pais, Claudio e Lourdes, pelo amor, carinho e apoio dedicados à minha criação, por ensinar valores e ter dado toda a estrutura para me tornar a pessoa que sou hoje. Ao meu irmão Bruno, pela convivência e amizade durante todo o tempo. Aos meus familiares, em especial à minha querida avó Rosalina, meus tios Jorge, Luiza e Dedé, minha prima Nathalia e minha cunhada Carol. A Cris e filhos, por sempre terem me recebido bem em vossa casa.

Dedico este trabalho ao meu avô Emidio (*in memorian*) por ter me despertado a paixão pela engenharia civil. Infelizmente não pode estar presente neste momento tão feliz da minha vida, mas com certeza estará me guiando pelo resto da minha existência.

Sou particularmente grato à Tayane pelo amor, cumplicidade e compreensão durante os três anos que convivemos. Obrigado por ter me aturado nos momentos de estresse e estar ao meu lado quando eu mais precisei.

Um agradecimento muito especial aos meus amigos Bruno, Daniel Moraes, Caroline, Diogo, Matheus, Mayara, Raphael e Vitor, pelo companheirismo e amizade ao longo dos 5 anos nessa trajetória árdua e vencedora.

Agradeço imensamente aos meus orientadores Elaine e Silvoso pela dedicação, paciência e incentivo fundamentais para a conclusão deste trabalho.

Agradeço também a todos os funcionários do Laboratório de Estruturas e Materiais da COPPE/UFRJ pela colaboração durante as atividades realizadas.

Resumo do Projeto de Graduação apresentado à Escola Politécnica/ UFRJ como parte dos requisitos necessários para a obtenção do grau de Engenheiro Civil.

**AVALIAÇÃO DA UTILIZAÇÃO DA CINZA DO BAGAÇO DE CANA-DE-AÇÚCAR EM CONCRETO USANDO CONSTRUÇÕES RESIDENCIAIS DE MENOR IMPACTO**

Thiago da Cruz Sessa

Abril, 2013

Orientadores: Elaine Garrido Vazquez e Marcos Martinez Silvoso

Curso: Engenharia Civil

A indústria cimenteira tem grande contribuição para as emissões de CO<sub>2</sub> do mundo. Com o objetivo de minimizar os índices de emissões de CO<sub>2</sub>, bem como as consequências do aquecimento global, pesquisas vêm sendo desenvolvidas com o intuito de reduzir o volume de cimento produzido no planeta através de adições minerais. O presente trabalho visa, através de procedimentos experimentais, analisar as propriedades de concretos de baixo impacto ambiental nos estados fresco e endurecido, produzidos com aproveitamento de cinzas do bagaço de cana-de-açúcar nos teores de 20 e 40%. Este produto representa um importante passivo ambiental da indústria sucroalcooleira do norte do Estado do Rio de Janeiro e seu emprego como pozolanas em substituição parcial do cimento Portland tem demonstrado um grande potencial de utilização. As metodologias usadas desde a produção e tratamento da cinza até a caracterização dos outros materiais presentes no concreto também são abordados na pesquisa. Além disso, é estimado, em um caso real, o benefício ecológico proveniente dessa substituição através do Método para a Quantificação das Emissões de Dióxido de Carbono (Método QE-CO<sub>2</sub>) que utiliza informações sobre fatores de emissão e outros parâmetros como extração de matérias-primas e transporte para geração de estimativas. Os resultados obtidos indicam a viabilidade da utilização das cinzas do bagaço de cana-de-açúcar na aplicação de concretos na indústria da construção civil.

*Palavras-chave:* cinza do bagaço de cana-de-açúcar, atividade pozolânica, impacto ambiental, emissão de CO<sub>2</sub>.

Abstract of Undergraduate Project presented to POLI/UFRJ as a partial fulfillment of the requirements for the degree of Engineer.

## EVALUATION OF THE USE OF SUGARCANE BAGASSE ASH IN CONCRETE USING RESIDENTIAL BUILDINGS WITH LOW ENVIRONMENTAL IMPACT

Thiago da Cruz Sessa

April/2013

Advisors: Elaine Garrido Vazquez e Marcos Martinez Silvoso

Course: Civil Engineering

The cement industry has a great contribution to CO<sub>2</sub> emissions in the world. Aiming to reduce the levels of CO<sub>2</sub> emissions, and the consequences of global warming, researchs have been developed with the aim of reducing the cement volume produced in the planet through mineral admixtures. This paper aims, through experimental procedures, analyze the consistency and mechanic strength on concrete with low environmental impact, made from sugarcane bagasse ash in the levels of 20 and 40%. This product represents an important environmental liability of the alcohol industry's northern state of Rio de Janeiro and its use as a pozzolan in partial replacement of Portland cement has shown great potential for use. The methodologies used from production and processing of ash to the characterization of other materials in the concrete are also addressed in this study. Furthermore, it is estimated, on a real case, the ecological benefit derived by the Method for Quantifying Emissions of Carbon Dioxide (QE-CO<sub>2</sub> Method) that uses information on emission factors and other parameters such as raw materials extracting and transportation for generation of estimates. The results indicate the feasibility of using sugarcane bagasse ashes in application of concretes in the construction industry.

*Keywords:* sugarcane bagasse ash, pozzolanic activity, environmental impact, CO<sub>2</sub> emission

# Índice

<b>1. INTRODUÇÃO .....</b>	<b>1</b>
1.1. Apresentação do tema.....	1
1.2. Justificativa .....	4
1.3. Objetivos .....	5
1.4. Metodologia.....	6
1.5. Estrutura do trabalho .....	6
<b>2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA .....</b>	<b>8</b>
2.1. Cimento <i>portland</i> .....	8
2.1.1. Histórico .....	8
2.1.2. Definição e composição.....	9
2.1.3. Reação de hidratação.....	10
2.2. Adições minerais .....	11
2.3. Cinza do bagaço da cana-de-açúcar .....	14
2.3.1. A cana-de-açúcar .....	14
2.3.2. O Bagaço da cana-de-açúcar .....	16
2.3.3. Pozolana .....	17
2.3.4. Cinza proveniente do bagaço .....	19
2.3.5. Uso da CBCA como aditivo mineral.....	20
2.4. Avaliação da emissão de CO <sub>2</sub> em concretos .....	25
<b>3. MATERIAIS E MÉTODOS.....</b>	<b>29</b>
3.1. Produção da cinza do bagaço de cana-de-açúcar .....	29
3.2. Ensaios para caracterização de materiais .....	32
3.2.1. Cinza do bagaço da cana-de-açúcar .....	32
3.2.2. Cimento <i>portland</i> .....	36
3.2.3. Agregados .....	38
3.2.4. Aditivo superplastificante .....	42

3.3.	Produção dos concretos .....	42
3.3.1.	Dosagem.....	43
3.3.2.	Preparo das amostras .....	44
3.4.	Ensaio com o concreto no estado fresco .....	47
3.5.	Ensaios mecânicos.....	48
3.5.1.	Resistência à compressão.....	48
3.5.2.	Resistência à tração por compressão por diametral .....	49
<b>4.</b>	<b>APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS.....</b>	<b>51</b>
4.1.	Análise das propriedades do concreto fresco .....	51
4.2.	Comportamento mecânico dos concretos.....	52
4.2.1.	Resistência à compressão axial.....	52
4.2.2.	Resistência à tração por compressão diametral .....	55
4.2.3.	Módulo de elasticidade .....	57
<b>5.</b>	<b>EXEMPLO DE ESTIMATIVA DE EMISSÃO DE CO<sub>2</sub> EM EDIFICAÇÃO RESIDENCIAL .....</b>	<b>61</b>
5.1.	Método utilizado .....	61
5.2.	Fator de emissão (FEP) para cinza do bagaço da cana-de-açúcar.....	63
5.2.1.	Transporte .....	63
5.2.2.	Moagem .....	64
5.3.	Fator de emissão (FEP) para concretos .....	65
5.4.	Aplicação em edificação residencial .....	66
<b>6.</b>	<b>CONSIDERAÇÕES FINAIS.....</b>	<b>70</b>
6.1.	Conclusões.....	70
6.2.	Sugestões para trabalhos futuros .....	71
<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....</b>		<b>72</b>
<b>ANEXOS .....</b>		<b>81</b>

# **1. INTRODUÇÃO**

## **1.1. Apresentação do tema**

A construção civil é reconhecida como uma das atividades propulsoras do desenvolvimento social e econômico, uma vez que gera desenvolvimento local e emprego para a população. Os edifícios e obras civis são considerados os produtos físicos com maior vida útil que a sociedade produz, eles alteram a natureza, a função e a paisagem de áreas urbanas e rurais (FOSSATI, 2008).

No primeiro semestre de 2012, o setor de construção civil foi o que criou mais oportunidades de trabalho no estado do Rio de Janeiro com 25.833 vagas formais. Foi o único setor no estado a apresentar crescimento em relação ao mesmo período de 2011, quando foram criadas 21.072 novas vagas. Os dados são do estudo Acompanhamento do Mercado Formal de Trabalho Fluminense, divulgado pela Federação das Indústrias do Estado do Rio de Janeiro (FIRJAN, 2012).

Por outro lado, a incansável busca do homem por matéria-prima para a sua sobrevivência e para a produção de bens tem transformado as paisagens naturais, degradando o meio ambiente e, consequentemente, gerando uma quantidade excessiva de resíduos. Segundo Ângulo (2005), estima-se, no Brasil, um montante de 68,5 milhões de resíduos de construção civil produzidos por ano.

A considerável produção de resíduos nas atividades de construção civil, reformas, ampliações e demolições e sua respectiva destinação final, quando não realizadas em conformidade com a legislação vigente, podem resultar em impactos ambientais que muitas vezes são visíveis como assoreamento de rios, obstrução de vias e queimadas. Essas consequências trazem transtornos para a própria população, caracterizando-se em danos provocados por nós mesmos.

O concreto, principal material de engenharia empregado pelo homem, é um dos maiores causadores da degradação ambiental. Desde a antiguidade já haviam compostos formados por água, agregados e aglomerantes servindo de matéria-prima para a construção de diversas estruturas que persistem ao longo dos séculos a ações intempéricas diversas e perduram até os dias atuais (SOUTO, 2010). O artigo publicado em 1964 por Brunauer e Copeland deu ao concreto a condição de segundo material mais consumido pelo homem, sendo superado apenas pela água. Tal condição pode ser explicada por fatores como durabilidade, custo de produção relativamente baixo, versatilidade de formas e elevada resistência mecânica. Mehta

(2008) estimou um consumo mundial de concreto na ordem de 11 bilhões de toneladas ao ano.

Como consequência, o elevado consumo deste compósito tem motivado um desafio a ser enfrentado pela indústria do concreto nos dias atuais, o qual consiste na coexistência do desenvolvimento tecnológico e da preservação do meio ambiente, principalmente em função dos problemas associados à produção do cimento *Portland*, seu principal constituinte (CORDEIRO, 2006).

Estudos realizados pelo Sindicato Nacional da Indústria do Cimento – SNIC (2010) indicaram uma produção de cerca de 2,5 bilhões de toneladas/ano de cimento *Portland* no mundo, sendo o Brasil, o décimo maior produtor de cimento do mundo e o primeiro da América Latina com 59,80 milhões de toneladas no ano de 2009.

O crescimento do setor da construção nos últimos anos contribui para esse número e pode ser explicado principalmente pela política econômica nacional, com destaque para o aumento da oferta de linhas de créditos destinadas à habitação e a redução de impostos. A figura 1 a seguir retrata esse aumento na produção do cimento em nosso país.



Figura 1 - Produção anual de cimento *Portland* no Brasil

Fonte: SOUTO (2010)

Estudos demonstram que para a produção de uma tonelada de cimento, consome-se cerca de 5 GJ de energia (STRUBLE e GODFREY, 2004) e aproximadamente 1,7 toneladas de matéria-prima, sendo composta basicamente de calcário e argila. A produção do cimento é responsável, ainda, pela emissão de cerca de uma tonelada de dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ), por tonelada de clínquer produzido,

além de outros gases intensificadores do efeito estufa, como CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub>, NO<sub>x</sub>, NO<sub>2</sub> e SO<sub>2</sub>, em proporções menores (MEHTA, 2008).

Segundo o SNIC e a Associação Brasileira de Cimento *Portland* - ABCP (2010), aproximadamente 90% das emissões de CO<sub>2</sub> oriundas da fabricação de cimento ocorrem durante a produção do clínquer (material intermediário do cimento), seja na calcinação/descarbonatação da matéria-prima, seja com a queima de combustíveis no interior do forno. A parcela restante resulta do transporte de matérias-primas e das emissões pelo consumo de energia elétrica nas fábricas.

Devido ao alto consumo de cimento em países em desenvolvimento, Malhotra (1999) previu aumentos substanciais nas taxas de emissão de gases intensificadores do efeito estufa associadas à indústria cimenteira, a menos que medidas mitigadoras sejam adotadas. Ainda segundo o autor, apenas China, Índia e Brasil são responsáveis por cerca de 36% de toda a produção mundial de clínquer.

Com relação ao panorama nacional, o cimento é produzido em diversos estados da federação. O parque industrial cimenteiro, em 2009, era constituído por 69 fábricas, das quais 46 eram fábricas integradas, com forno de produção de clínquer, e 23 eram apenas moagens, que iniciam seu processo a partir do clínquer pronto. A figura 2 apresenta a participação regional na produção de cimento no Brasil (SNIC, ABCP, 2010).

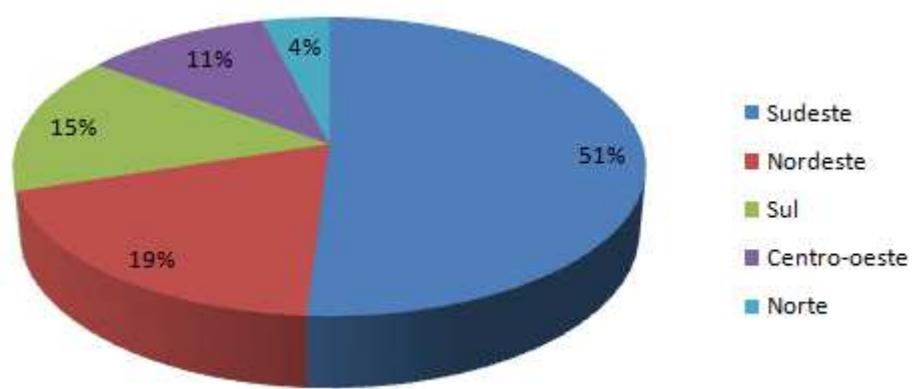


Figura 2 - Participação regional na produção brasileira de cimento em 2008

Fonte: Autor (2013), adaptado de Companhia Ambiental do Estado de São Paulo (2010)

## **1.2. Justificativa**

Dentro do contexto apresentado, nos últimos anos têm-se intensificado as pesquisas mundiais com o intuito de reduzir o volume de cimento empregado na elaboração de concretos. Uma das maneiras de diminuir estes índices está relacionada à substituição parcial do volume de cimento por uma ou mais adições minerais que atuem quimicamente, como as pozolanas ou materiais com ação física. Em geral, estes materiais são resíduos de processos industriais ou agroindustriais.

A transformação de resíduos em produtos para a indústria do concreto com o intuito de produzir o clínquer pode reduzir despesas e mitigar o impacto ambiental relativo à extração de matérias-primas. Além dos aspectos econômicos e ambientais, é importante destacar as vantagens técnicas advindas da incorporação de materiais pozolânicos ao concreto. Muitas pesquisas indicam benefícios na reologia, nas propriedades mecânicas e na durabilidade proporcionados pelo emprego de aditivos minerais em concreto (MALHOTRA e MEHTA, 1996; NEVILLE, 1997; MASSAZZA, 1998; SABIR et al., 2001).

A tecnologia de substituir parte do cimento *Portland* por aditivos minerais se mostra bastante viável, visto que a agroindústria, uma das mais antigas atividades econômicas do país, apresenta um elevado desenvolvimento tecnológico, somado as boas condições geológicas e climáticas existentes no país.

Da agroindústria, merece destaque o setor sucroalcooleiro que vem se expandindo nos últimos tempos, alavancado principalmente pelo advento da energia renovável. No Brasil, a produção de cana-de-açúcar vem avançando em áreas destinadas à pecuária extensiva e a outras culturas importantes como a soja, o milho e a laranja; sendo utilizada tanto para a geração de energia elétrica pela queima do bagaço (cogeração) quanto pelo uso de etanol como combustível de veículos automotores.

Essa tradição nacional no plantio de cana-de-açúcar ocorre desde o século XVIII, quando o açúcar despontou como o principal produto de exportação, e atualmente o país é responsável pela produção de cerca de 60% do álcool etílico consumido no planeta e é o maior produtor mundial de açúcar. A cultura da cana-de-açúcar representa uma das principais atividades agrícolas do país e ocupa uma área plantada de cerca de 3 milhões de hectares distribuída por grande parte do território nacional (MAPA, 2008; ÚNICA, 2009).

Segundo a Companhia Nacional de Abastecimento (CONAB), a previsão do total de cana moída na safra 2012/13 é de 596,63 milhões de toneladas, com aumento de 6,5% em relação à safra 2011/12, que foi de 560,36 milhões de toneladas, significando que a quantidade que será moída deve ser 36,3 milhões de toneladas a mais que na safra anterior. Desta forma, a disponibilidade de resíduos originários por este setor tem condições de abastecer, mesmo que de forma parcial, a indústria cimenteira nacional.

Com base nos estudos desenvolvidos por Martins *et al.* (2007), para cada tonelada de cana-de-açúcar são gerados cerca de 260 quilos (26%) de bagaço, que, quando queimado nas caldeiras produz aproximadamente 6 quilos (2,4%) de cinza que contém 77% de areia de quartzo e pó de carvão. Desta forma, tem-se aproximadamente 3,36 milhões de toneladas de cinza disponíveis na indústria sucroalcooleira do país.

Diante do panorama apresentado, estudos relacionados com a aplicação de cinzas agroindustriais como aditivo mineral são de grande valia, uma vez que podem possibilitar a produção de concretos com maior resistência e durabilidade, além de propiciar a redução de custos e de impactos ambientais decorrentes da disposição dos resíduos (CORDEIRO, 2006).

Neste trabalho, portanto, propõe-se estudar a aplicação da cinza do bagaço de cana-de-açúcar em elementos da construção civil e quantificar, em um caso particular, o benefício ecológico advinda da substituição parcial do cimento *Portland* pela cinza em questão.

### **1.3. Objetivos**

Esse trabalho tem como objetivo geral implantar alternativas para o emprego de cinza proveniente da queima do bagaço da cana-de-açúcar dentro da indústria da construção civil, avaliando a possibilidade de sua utilização em substituição parcial ao cimento *Portland*, especificamente na produção de concretos.

Acredita-se que o estudo possa contribuir para o desenvolvimento de estratégias de racionalização ambiental na construção, cujo setor, em geral, é marcado pelo conservadorismo e barreiras à inovação. Acrescenta-se a importância da sensibilização dos profissionais sobre a gestão de energia e emissão equivalente de CO<sub>2</sub>, já que a adequação deste panorama pelas empresas do mercado da construção civil é uma questão de sobrevivência.

Os objetivos específicos deste plano de pesquisa podem ser definidos como o desenvolvimento da metodologia de produção da cinza do bagaço de cana-de-açúcar; caracterização dos outros constituintes presentes no concreto; rompimento dos corpos-de-prova nas idades de 1, 3, 7 e 28 dias de cura; análise e interpretação dos resultados das propriedades de um concreto produzido com 20% e 40% de cinza do bagaço em seu estado fresco e endurecido (avaliação de resistência à compressão simples, resistência à tração por compressão diametral e módulo de elasticidade); e, por fim, a estimativa da emissão de CO<sub>2</sub> em uma edificação residencial utilizando-se a cinza ao invés do cimento em parte do concreto.

#### **1.4. Metodologia**

O estudo faz parte de uma pesquisa de Iniciação Científica no Laboratório de Estruturas da COPPE/UFRJ iniciada em agosto de 2010 e finalizada em janeiro de 2012 realizada juntamente com o aluno de arquitetura da FAU/UFRJ Tiago Nascimento de Souza. A pesquisa está servindo de base para realização deste Projeto Final do curso de Engenharia Civil.

O trabalho foi estruturado em três partes: a primeira etapa engloba uma revisão sobre a temática a partir da revisão bibliográfica, artigos, revistas e diversas referências eletrônicas. A segunda parte compreende a análise experimental, visando contextualizar e demonstrar os conceitos abordados, seus resultados e considerações. Já a terceira etapa caracteriza uma construção residencial unifamiliar selecionada como estudo de caso, com intuito de estimar a liberação de CO<sub>2</sub> da obra trocando uma parcela do cimento pela cinza do bagaço da cana-de-açúcar (CBCA) .

Após a etapa de revisão bibliográfica, o programa experimental realizado englobou atividades como visita a campo para acompanhamento do processo de produção da cinza proveniente do bagaço da cana-de-açúcar (CBCA); definição do concreto de referência e a caracterização de seus materiais; moldagem e dosagem do concreto de referência e do concreto com CBCA; ensaios mecânicos para a avaliação da resistência nos corpos de prova de referência; e por fim a análise dos resultados.

#### **1.5. Estrutura do trabalho**

O presente capítulo apresenta uma breve introdução ao tema, explicitando os objetivos, a justificativa, a metodologia e a estrutura do trabalho.

O segundo capítulo engloba uma revisão bibliográfica dos principais temas referentes ao trabalho como: a evolução do uso de adições minerais na produção de concretos de cimento Portland; a descrição de características físico-químicas associadas aos aditivos minerais usualmente aplicados em concreto; os principais efeitos produzidos pelos aditivos quando incorporados ao concreto como os efeitos físicos e as reações pozolânicas; as características físico-químicas da cinza residual do bagaço de cana-de-açúcar e sobre o emprego deste material em pastas e argamassas de cimento Portland; e também trata sobre a avaliação e métodos de se estimar a liberação de CO<sub>2</sub> em concretos .

O terceiro capítulo comprehende a descrição dos materiais e métodos de pesquisa, onde são apresentadas as diferentes proporções de CBCA nos concretos que são objetos de estudo deste trabalho e é feita a caracterização dos materiais que constituem o concreto.

No quarto capítulo, são apresentados os resultados dos ensaios mecânicos. São discutidos os resultados de resistência à compressão axial, resistência à tração por compressão diametral e módulo de elasticidade.

O quinto capítulo apresenta um método para avaliar a emissão de CO<sub>2</sub>, considerando as etapas de extração, processamento e transporte dos materiais de construção; e a aplicação deste método para uma edificação residencial.

O sexto e último capítulo engloba as considerações finais retomando os aspectos mais importantes do trabalho, avaliando se o objetivo foi atingido, sugerindo aplicações futuras sobre o tema desenvolvido.

## 2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

No presente capítulo foram analisadas as mais recentes obras científicas disponíveis que tratam do assunto e que forneceu o embasamento teórico e metodológico para o desenvolvimento do trabalho. Além disso, serão explicitados os principais conceitos e termos técnicos utilizados na pesquisa.

### 2.1. Cimento *portland*

#### 2.1.1. Histórico

A palavra "cimento" é originada do latim "*caementum*", que designava na velha Roma espécie de pedra natural de rochedos e não esquadrejada. A origem do cimento remonta há 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 *Pantheon* e o Coliseu (figura 3), foram construídas com o uso de solos de origem vulcânica da ilha grega de Santorino ou das proximidades da cidade italiana de Pozzuoli, que possuíam propriedades de endurecimento sob a ação da água (ABCP, 2012).



Figura 3 - Grandes obras construídas com o emprego do concreto

Fonte: <http://imperioroma.blogspot.com.br> (acessado em 08/01/2013)

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 submeteu o compósito desenvolvido por Smeaton a elevadas temperaturas em fornos de alvenaria, resultando em um pó fino que depois de hidratado e seco apresentava características semelhantes as rochas naturais. Em 15 de dezembro de 1824, J. Aspdin obteve a patente para produção do primeiro “cimento *Portland*” conhecido no mundo (HELENE e TERZIAN, 1993).

A aparição deste cimento no Brasil se deu em 1924, com a implantação pela Companhia Brasileira de Cimento *Portland* de uma fábrica em Perus, Estado de São Paulo, cuja construção pode ser considerada como o marco da implantação da indústria brasileira de cimento. As primeiras toneladas foram produzidas e colocadas no mercado em 1926. Até então, o consumo de cimento no país dependia exclusivamente do produto importado. A produção nacional foi gradativamente elevada com a implantação de novas fábricas e a participação de produtos importados oscilou durante as décadas seguintes, até praticamente desaparecer nos dias de hoje (ABCP, 2012).

### **2.1.2. Definição e composição**

A Norma NBR 5732/1991 define o cimento *Portland* comum como "Aglomerante hidráulico obtido pela moagem do clínquer *Portland* ao qual se adiciona, durante a operação, a quantidade necessária de uma ou mais formas de sulfato de cálcio. Durante a moagem é permitido adicionar a esta mistura materiais pozolânicos, escórias granuladas de alto-forno e/ou materiais carbonáticos em teores especificados pela Norma".

Os cimentos *Portland* constituem 50% de toda a produção mundial de cimentos. Feitos de matéria prima barata, objetos feitos com eles possuem alta resistência mecânica, resistência total ao ar e a baixas temperaturas, endurecem rapidamente tanto no ar quanto na água. Obtidos através da calcinação do calcário argiloso (1400 a 1450 °C) o produto calcinado chama-se clínquer. Os principais componentes do cimento *Portland* são apresentados na tabela 1.

Tabela 1- Principais compostos do cimento *Portland*

Nome do composto	Composição	Abreviação
Silicato Tricálcio ( <i>alita</i> )	$3\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$	$\text{C}_3\text{S}$
Silicato dicálcio ( <i>belita</i> )	$2\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$	$\text{C}_2\text{S}$
Aluminato tricálcio	$3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$	$\text{C}_3\text{A}$
Ferroaluminato tetracálcio ( <i>ferrita</i> )	$4\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{Fe}_2\text{O}_3$	$\text{C}_4\text{AF}$

Fonte: Autor (2013), adaptado de Mehta e Monteiro (2008)

### 2.1.3. Reação de hidratação

O cimento só adquire sua propriedade adesiva em meio aquoso onde ocorrem reações químicas entre os silicatos e aluminatos com a água. Este processo denomina-se hidratação do cimento. As reações de hidratação se processam, ao longo do tempo, sob mecanismos diferentes.

Inicialmente, a hidratação ocorre por dissolução-precipitação, mecanismo que comprehende a dissolução de compostos anidros, formação de hidratos na solução e, devido às suas baixas solubilidades, precipitação dos produtos hidratados. Em estágios posteriores, devido à baixa mobilidade iônica, a hidratação pode ocorrer por reações no estado sólido, denominadas topoquímicas (MEHTA e MONTEIRO, 2008).

O silicato tricálcico ( $\text{C}_3\text{S}$ ) apresenta rápida hidratação e desprende uma quantidade média de calor quando comparado com as outras fases. A hidratação do  $\text{C}_3\text{S}$  gera um gel de silicato de cálcio hidratado (C-S-H) e cristais de hidróxido de cálcio,  $\text{Ca}(\text{OH})_2$ . O  $\text{C}_3\text{S}$  é responsável pela resistência inicial da pasta endurecida e também pelo aumento de sua resistência final.

Já o silicato dicálcico ( $\text{C}_2\text{S}$ ), que desprende uma quantidade pequena de calor durante sua lenta hidratação, é responsável pelo aumento de resistência nas idades avançadas e produz C-S-H e hidróxido de cálcio em menor volume, em comparação com o  $\text{C}_3\text{S}$ .

O aluminato tricálcio ( $\text{C}_3\text{A}$ ) contribui para a resistência, especialmente no primeiro dia, favorece bastante o calor de hidratação e quando presente na forma cristalina é o responsável pela rapidez da pega. Os aluminatos são conhecidos por hidratarem em uma velocidade muito maior que os silicatos.

O ferroaluminato tetracálcio ( $C_4AF$ ) também se hidrata rapidamente (semelhante ao  $C_3A$ ), mas exerce pouca influência sobre as propriedades da pasta. O termo  $C_4AF$  não indica um composto químico, mas uma solução ternária de composição variável e frequentemente não definida. Os compostos que se formam pela hidratação da fase férrica não são facilmente distinguíveis dos normalmente obtidos pela hidratação do  $C_3A$  (MEHTA e MONTEIRO, 2008; SOUTO, 2010).

## 2.2. Adições minerais

A NBR 11172/1990 recomenda a utilização do termo “adição” para designar “produto de origem mineral adicionado aos cimentos, argamassas e concretos, com a finalidade de alterar suas características” e do termo “aditivo” para “produto químico adicionado em pequenos teores às caldas, argamassas e concretos com a finalidade de alterar suas características no estado fresco e/ou no endurecido”.

Segundo Moraes (2012), os aditivos minerais diferem dos aditivos químicos pelo fato de somar ou substituir o cimento devido às suas propriedades semelhantes às do cimento, enquanto que os aditivos químicos alteram as características do cimento, sem alterar sua proporção na composição do mesmo.

Desta forma, aditivos minerais podem ser definidos como materiais utilizados conjuntamente com o cimento *Portland* com o objetivo de proporcionar um desempenho tecnológico diferenciado a produtos cimentícios. Em alguns casos, pode haver redução dos custos de produção em função da substituição de uma parcela de clínquer por materiais energeticamente menos nobres, uma vez que os aditivos minerais são obtidos normalmente a partir de resíduos industriais ou agroindustriais (CORDEIRO, 2006).

Para Nita e John (2007), as adições minerais são definidas como aquelas que possuem em sua composição silicatos ou silico – aluminatos amorfos com nenhuma ou pouca atividade aglomerante, mas que quando em contato com a água e em temperatura ambiente reagem com o hidróxido de cálcio formando componentes com propriedades cimentantes.

Ainda segundo Cordeiro (2006), além dos benefícios tecnológicos e econômicos em alguns casos, o uso de aditivos minerais pode reduzir impactos ambientais, tendo em vista o aproveitamento de resíduos, a preservação das jazidas de calcário e argila e a menor emissão de  $CO_2$  e outros gases intensificadores do

efeito estufa ( $\text{CO}$ ,  $\text{CH}_4$ ,  $\text{NO}_x$ ,  $\text{NO}_2$  e  $\text{SO}_2$ ), gerados durante a fabricação do cimento *Portland*.

Segundo Winslow et al. (1994), adições minerais introduzidas ao concreto diminuem tanto a porosidade quanto a conectividade entre os poros. Devido a essa baixa porosidade, ocorre a diminuição do volume de vazios do concreto, a redução de fissuras térmicas devido ao baixo calor de hidratação, aumento da resistência final e redução da permeabilidade.

De forma geral, pode-se atribuir estes efeitos físicos e químicos às mudanças nas propriedades de produtos cimentícios confeccionados com aditivos minerais. Os efeitos físicos podem ser divididos em três: diluição do cimento *Portland*, efeito *filler* e nucleação (CORDEIRO, 2006; SOUTO, 2010).

A diluição é um efeito adverso proporcionado pela substituição de uma parcela do cimento pelo aditivo mineral. Este efeito é equivalente ao aumento da relação água-cimento e é inversamente proporcional ao teor de substituição. Naturalmente, menos cimento implica menos produtos formados pelas reações de hidratação (LAWRENCE et al., 2003).

As adições minerais, enquanto não se iniciam as reações pozolânicas, atuam como efeito *filler*, ou seja, como partículas inertes e não como aglomerantes, e por terem uma finura muito maior que o cimento, tendem a preencher os espaços existentes que seriam ocupados pelo ar (LACERDA, 2005). O esquema apresentado na Figura 4 representa o efeito *filler*, através da ação conjunta de um aditivo mineral de elevada finura, um aditivo químico superplastificante, cimento *Portland* e água.

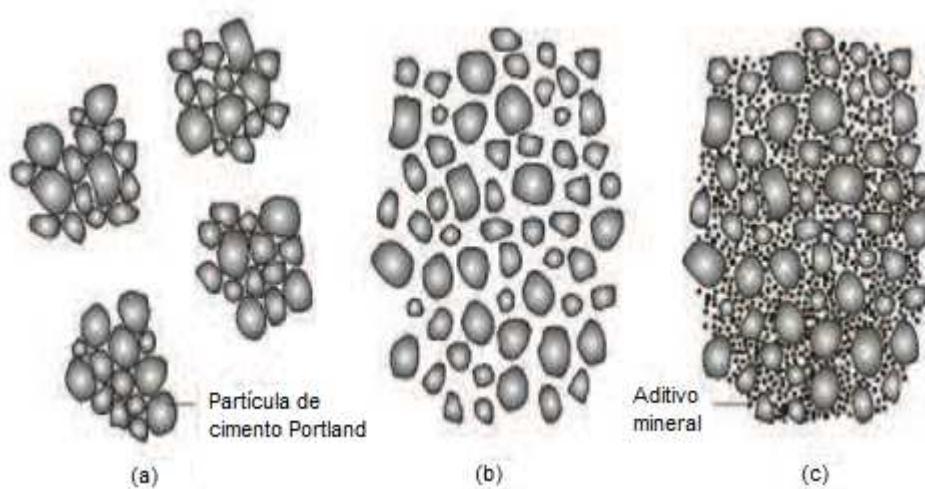


Figura 4 - Pasta de cimento sem aditivos (a), com aditivo super plastificante (b) e com super plastificante e aditivo mineral de elevada finura (c).

Fonte: Autor (2013), adaptado de Mehta e Monteiro (2008)

Na figura (2-a), tem-se uma pasta contendo somente água e cimento cujas partículas encontram-se aglomeradas em função de forças atrativas de origem eletrostática. Na figura (2-b), emprego de aditivo superplastificante promove a deflocação e dispersão das partículas de cimento, o que contribui para sua completa hidratação. Por fim, a incorporação do aditivo mineral à pasta (Figura 2-c) possibilita o preenchimento dos vazios entre as partículas de cimento disperso, o que promove aumento na compacidade da mistura e, consequentemente, refinamento da rede porosa (CORDEIRO, 2006).

Segundo Malhotra e Mehta (1996), as partículas muito finas de cimento *Portland* poderiam, teoricamente, proporcionar o mesmo efeito físico apresentado pelas partículas de aditivo mineral, porém elas dissolvem-se rapidamente quando em contato com a água, o que torna ineficiente o efeito de densificação da mistura.

As adições minerais podem ser classificadas de acordo com a tabela 2:

Tabela 2 - Classificação e exemplo de aditivos minerais

Classificação	Tipo de adições
Cimentantes	Escória granulada de alto-forno
Superpozolanas	Sílica ativa
	Metacaulim
	Cinzas de casca de arroz
Pozolanas comuns	Cinzas voltantes com baixo teor de cálcio
	Argilas calcinadas
	Materiais naturais (origem vulcânica e sedimentar)
Pozolanas pouco reativas	Escória de alto-forno resfriada lentamente
	Cinzas de forno
	Escória de caldeira
	Palha de arroz queimada em campo
Adições inertes (filler)	Calácia, pó de cálcio, pó de pedra

Fonte: Autor (2013), adaptado de Mehta e Monteiro (2008)

Por fim, é importante frisar que as adições minerais melhoram as propriedades do concreto, mas não se deve esperar que possam compensar a baixa qualidade dos constituintes do concreto ou de um traço pobre.

## 2.3. Cinza do bagaço da cana-de-açúcar

### 2.3.1. A cana-de-açúcar

A cana-de-açúcar é uma cultura típica de climas tropicais e subtropicais que se adapta com relativa facilidade a diferentes tipos de solos. É uma das variedades agronômicas de maior eficiência no processo de fotossíntese, por utilizar entre 2% e 3% da radiação solar incidente na produção de biomassa vegetal (LORA *et al.*, 2001). A composição química típica da cana-de-açúcar é apresentada tabela 3.

Tabela 3 - Composição típica da cana-de-açúcar

Composto	Quantidade (%), em massa
Água	74,5
Sacarose (pol*)	12,5
Fibras	10,0
Outros	3,0

\* pol: percentual de sacarose aparente no caldo de cana-de-açúcar

Fonte: Autor (2013), adaptado de Cesnik e Miocque (2004)

O cultivo da cana-de-açúcar e a produção de seus derivados estão intimamente ligados à própria história e ao desenvolvimento do Brasil. Primeiramente transformada em açúcar, a cana-de-açúcar ocupa um importante papel na economia, surgindo o Brasil como líder mundial na produção de açúcar e álcool. Porém, mesmo após séculos de convívio com a agroindústria canavieira, somente no século XX, o Brasil descobriu no álcool uma opção energética viável. Esse Programa foi desenvolvido para evitar o aumento da dependência externa de divisas quando dos choques de preço de petróleo no começo da década de 1970. De 1975 a 2000, foram produzidos cerca de 5,6 milhões de veículos movidos a álcool hidratado (LIMA, SALES, MORETTI, ALMEIDA E SANTOS, 2010).

Produzida em mais de 130 países, no Brasil a cana-de-açúcar é cultivada em mais de oito milhões de hectares (CONAB, 2008). O Brasil é atualmente o responsável por cerca de 60% da produção de álcool etílico do planeta e é o maior produtor mundial de cana-de-açúcar e de açúcar, além de ser o maior exportador de açúcar do mundo.

Segundo o relatório anual da companhia nacional de abastecimento – CONAB, no ano de 2008 foram produzidas aproximadamente 560 milhões de toneladas de

cana-de-açúcar, que resultaram em 27,09 bilhões de litros de álcool e 32,78 milhões de toneladas de açúcar. Isto representou cerca de 6% do produto interno bruto do Brasil, de acordo com o Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE, 2008). O plantio da cana-de-açúcar é apresentado na figura 5.



Figura 5 - Plantação da cana-de-açúcar em território nacional

Fonte: <http://meioambiente.culturamix.com/agricultura> (acessado em 09/01/2013)

Um aspecto importante a ser considerado nessa cultura é a geração de subprodutos, como água de lavagem, bagaço, folhas e pontas, vinhaça, torta de filtro e leveduras. Destes subprodutos, merece destaque a queima do bagaço para geração de energia elétrica. O emprego deste subproduto é atrativo devido, principalmente, a seu poder calorífico médio de 7,74 MJ/kg (1850 kcal/kg) com umidade de 50% e aos grandes montantes de cana-de-açúcar processados dentro do setor sucroalcooleiro, tornando a quantidade gerada de bagaço significativa (COELHO, 1999).

Dentro do contexto da cogeração, e em face da crise do setor energético brasileiro, que teve início em 2001, o setor sucroalcooleiro tem apresentado um grande potencial de geração de energia, apresentando atrativos econômicos e ambientais, principalmente devido à queima de bagaço de cana-de-açúcar na produção como combustível.

Segundo Moreira e Goldemberg (2010), cerca de 450 a 500 kg de vapor são gerados a partir de uma tonelada de cana-de-açúcar. O potencial de geração de energia a partir do bagaço de cana é da ordem de 15% de toda demanda nacional, patamar que pode ser atingido até 2020. A Revista Pesquisa FAPESP (2011) destaca

que a geração de eletricidade com a queima do bagaço e da palha poderá superar, já em 2013, a capacidade da maior hidrelétrica do Brasil, a usina de Itaipu.

Na indústria sucroalcooleira, por muitos anos, existiu o grande desafio em relação ao descarte dos resíduos gerados no processo de produção de açúcar e álcool. Isso se deu porque o processo produtivo gerava prejuízos quando os resíduos eram descartados no meio ambiente. Atualmente, tornou-se uma vantagem econômica utilizar esses resíduos, à medida que geram externalidades positivas (LIMA, SALES, MORETTI, ALMEIDA E SANTOS, 2010).

### 2.3.2. O bagaço da cana-de-açúcar

De todos os resíduos da unidade industrial sucroalcooleira, o bagaço é um dos mais atrativos, apesar de não ser o de maior volume, por causa de seu poder calorífico, o que faz dele o principal combustível de todo o processo produtivo da fabricação do açúcar e do álcool. Este resíduo, atualmente, tem diversas aplicações na economia brasileira: na alimentação animal, na produção de combustível, na cogeração de energia, na indústria de cosméticos e na engenharia civil.

O bagaço, gerado durante a extração do caldo na moagem da cana-de-açúcar, constitui-se o maior resíduo da agricultura brasileira. Para cada tonelada de cana-de-açúcar moída, são gerados aproximadamente 320 kg de bagaço com 50% de umidade (BOCCHI, 2012). Sua composição em base anidra é de aproximadamente 50% de celulose ( $C_6H_{10}O_5$ ), 25% de hemicelulose ( $C_5H_8O_4$ ) e 25% de lignina ( $C_7H_{10}O_3$ ) (CORDEIRO, 2006). A Figura 6 mostra o bagaço de cana-de-açúcar e detalhes da sua estrutura fibrosa.

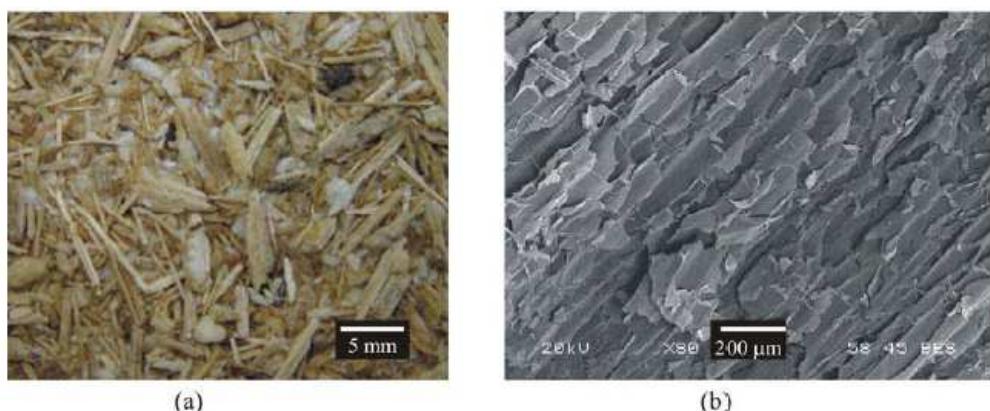


Figura 6 - Bagaço de cana-de-açúcar em fotografia (a) e micrografia que evidencia sua estrutura fibrosa (b)

Fonte: CORDEIRO (2006)

Segundo Silva *et al.* (2007), o bagaço de cana tem sido produzido cada vez em quantidades maiores devido ao aumento da área plantada e da industrialização da cana de açúcar, decorrentes principalmente de investimentos públicos e privados na produção alcooleira. A melhoria do balanço energético das antigas usinas e a entrada de atividade de um número cada vez maior de destilarias autônomas aumentou a porcentagem de sobras, consideravelmente.

O bagaço de cana é o resíduo agroindustrial obtido em maior quantidade no Brasil. Estima-se que a cada ano sejam produzidos de 5 a 12 milhões de toneladas desse material, correspondendo a cerca de 30% do total da cana moída. O bagaço é totalmente reaproveitado, enriquecendo a economia brasileira, em distintas áreas já citadas (BOCCHI, 2012).

De acordo com a Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL, 2008), o bagaço de cana, que responde pelas necessidades energéticas do setor sucroalcooleiro, é o recurso de maior potencial de energia elétrica no país, sendo previsto o desenvolvimento de diversos projetos que contemplam a geração de energia elétrica através da pirólise do bagaço de cana-de-açúcar. Assim, o bagaço passou a ser ainda mais valorizado como fonte primária de energia.

Souto (2010) destaca que uma característica importante e peculiar deste subproduto é fazer parte de um processo agroindustrial organizado, onde os custos, incluindo transporte, são debitados dos produtos nobres (açúcar e álcool), de maneira que dê para afirmar que o bagaço trata-se de um produto barato.

### **2.3.3. Pozolana**

A designação de pozolana se originou da utilização de materiais provenientes de regiões onde se encontravam cinzas vulcânicas, tais como a Ilha de Santorim e próximas à cidade de Nápoles. Em consequência das cinzas mais conhecidas e consideradas de melhor qualidade estarem próximas do Monte Puzzouli, este foi o motivo para a denominação do material (ZAMPIERI, 1993).

O termo pozolana, pode ser aplicado a todos os materiais de composição silicosa ou aluminosilicosa que, por si só, quase não têm propriedades hidráulicas, entretanto, quando finamente divididos e na presença de umidade em temperatura

ambiente reagem com o  $\text{Ca(OH)}_2$  formando compostos com propriedades cimentícias (NBR 12653, 1992; MEHTA e MONTEIRO, 1994; NEVILLE, 1997; ANDRIOLO, 1999).

Qualquer material que apresente as mesmas características descritas acima pode ser considerado pozolânico, sejam naturais ou artificiais, geralmente denominados de adições minerais. Um exemplo clássico de pozolana, muito utilizada nos dias atuais, é a argila calcinada, adquirindo propriedades pozolânicas em razão do desordenamento da estrutura cristalina (SOUTO, 2010).

A partir do conhecimento das propriedades pozolânicas de alguns materiais, a ABNT NBR 12653/1992 os classifica em naturais (materiais de origem vulcânica, geralmente de caráter petrográfico ácido ou de origem sedimentar) e artificiais (materiais provenientes de tratamento térmico ou subprodutos industriais com atividade pozolânica).

Segundo Nita (2007) as pozolanas naturais são pouco utilizadas no Brasil. As classificadas como artificiais, mais comuns na engenharia brasileira, são as que sofreram algum tratamento térmico como argilas e determinadas rochas que contém sílica, ou as provenientes dos subprodutos de atividades industriais e agroindustriais, sendo exemplificada pela cinza volante, cinza de casca de arroz, cinza de bagaço de cana-de-açúcar e bauxita.

Para determinação de uma atividade pozolânica, os materiais devem apresentar características básicas como reagir com o  $\text{Ca(OH)}_2$  em temperatura ambiente por um tempo não muito longo e formar compostos aglomerantes e insolúveis em águas similares aos obtidos na hidratação do cimento *Portland* (CINCOTTO, 1990; ZAMPIERI, 1993).

Tanto a intensidade quanto a velocidade de reações, assim como, a neoformação de compostos cimentícios, dependem de cada pozolana (ZAMPIERI, 1993). Essas necessitam de alguns fatores para dar origem à atividade pozolânica, tais como, a superfície específica elevada, a presença de silicatos  $\text{SiO}_2$  e óxido de alumínio ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) amorfos e capacidade de combinar com o  $\text{Ca(OH)}_2$  (BATTAGIN, 1987). Em outras palavras, é essencial o conhecimento prévio da composição química, das características físicas e da mineralogia da pozolana.

Lima (2006) relata que a atividade pozolânica para as idades iniciais se dá mediante a superfície específica. Nas idades mais avançadas, a dependência das reações está ligada à quantidade de  $\text{SiO}_2$  e  $\text{Al}_2\text{O}_3$  potencialmente reativas. Desta forma, as principais fases ativas das pozolanas são a sílica ( $\text{SiO}_2$ ) e alumina ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ),

na forma amorfa, ou seja, estruturas formadas por átomos com orientação somente à curta distância.

#### **2.3.4. Cinza proveniente do bagaço**

O último resíduo gerado pela cadeia da cana-de-açúcar são as cinzas da queima do bagaço, geradas na ordem de 25 kg de cinza para cada tonelada de bagaço (CORDEIRO, 2006). Essas cinzas são utilizadas como adubo nas lavouras, mas segundo pesquisas recentes (MANHÃES, 1999; SOUZA et al., 2007), a cinza do bagaço da cana-de-açúcar (CBCA) não apresenta nutrientes minerais adequados para essa finalidade. De acordo com Coelho (1999), para um teor de umidade de 50% a temperatura de ignição do bagaço está entre 500°C e 600°C, faixa que cai para 300°C a 400°C quando a umidade encontra-se entre 35% e 40%.

Segundo Paula (2006), a incineração do bagaço de cana-de-açúcar em condições não controladas gera cinza que pode conter altos teores de carbono e matéria orgânica. Além disso, a quantidade de carbono tem grande influência na absorção de água, pois o material carbonoso é extremamente fino, o que ocasiona um aumento na demanda de água.

A cinza do bagaço apresenta, em termos de óxidos, uma grande quantidade de dióxido de silício ( $\text{SiO}_2$ ), normalmente acima de 60% (em massa). Outra possível fonte de sílica para a cinza é a areia (quartzo), oriunda da lavoura, que não é totalmente removida durante a etapa de lavagem no processamento da cana-de-açúcar. Esta areia permanece no bagaço e pode ser observada nas operações de limpeza dos salões das caldeiras, onde ocorre a combustão (CORDEIRO, 2006).

Ainda segundo Cordeiro, a quantidade de cinza residual produzida anualmente no Brasil equivale a aproximadamente 2,5 milhões de toneladas, valor que representa cerca de 7% da produção de cimento *Portland* no Brasil em 2006. É importante destacar que a queima do bagaço produz substancial liberação de  $\text{CO}_2$ . Entretanto, o balanço nas emissões de  $\text{CO}_2$  é praticamente nulo, pois, através da fotossíntese, a biomassa queimada é reposta no ciclo seguinte da cultura da cana-de-açúcar.

Conforme pesquisa de Souza (2007), a destinação da CBCA é um dos problemas enfrentados pelos administradores das usinas. A fuligem gerada no processo é recolhida a partir de técnicas de lavagem e decantação e, juntamente com

a cinza de caldeira, constituem-se em resíduos finais do processo industrial, no qual não há possibilidade de redução do mesmo.

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, consequentemente, reduzir as despesas e o impacto ambiental relativos à sua disposição no meio ambiente. Além disso, a incorporação da CBCA pode agregar valor econômico ao resíduo agroindustrial e proporcionar vantagens técnicas e ambientais com a substituição parcial de cimento *Portland*.

### **2.3.5. Uso da CBCA como aditivo mineral**

Alguns estudos já foram realizados no sentido de utilizar a cinza residual do bagaço como aditivo mineral. Porém, pesquisas apontam para a viabilidade da cinza em conjunto com o cimento *Portland*, seja o substituindo parcialmente em concretos e argamassas, ou substituindo o agregado miúdo.

Para Cordeiro (2006), a redução ou até a inexistência de exsudação em concretos com adição e cinzas residuais está relacionada diretamente a superfície específica do material empregado. Giammusso (1992) considera que materiais com composições granulométricas reduzidas, maior superfície específica, apresentam tendência para uma maior retenção de água devido à adsorção do líquido na superfície dos grãos, fenômeno este que explica a inexistência de exsudação em concretos com presença de adições minerais.

O primeiro registro dessa tecnologia foi de Freitas (1996) que utilizou uma cinza residual coletada na Unidade Agroindustrial Usina São José, localizada no Município de Campos dos Goytacazes/RJ, para a confecção de tijolos de solo-cimento. Os resultados indicaram que a adição da cinza proporcionou aumento da resistência à compressão e redução da absorção de água em todos os traços estudados.

Freitas et al. (1998) verificou a influência da substituição de cimento *Portland* por cinza do bagaço na resistência à compressão de argamassas. Para tal, utilizou-se uma cinza residual classificada na peneira de  $75 \mu\text{m}$  em argamassas com relação água-material cimentício de 0,48. Misturas com teores de substituição de 5%, 10%, 15% e 20% foram confeccionadas, além da argamassa de controle, composta exclusivamente por cimento *Portland* como material cimentício. A mistura com 15% de

cinza do bagaço apresentou os melhores resultados de resistência à compressão até os 63 dias de cura, como pode ser observado na Figura 7. Os valores de resistência obtidos para as misturas com os demais teores de substituição não apresentaram diferenças significativas entre si e com relação à argamassa de controle.

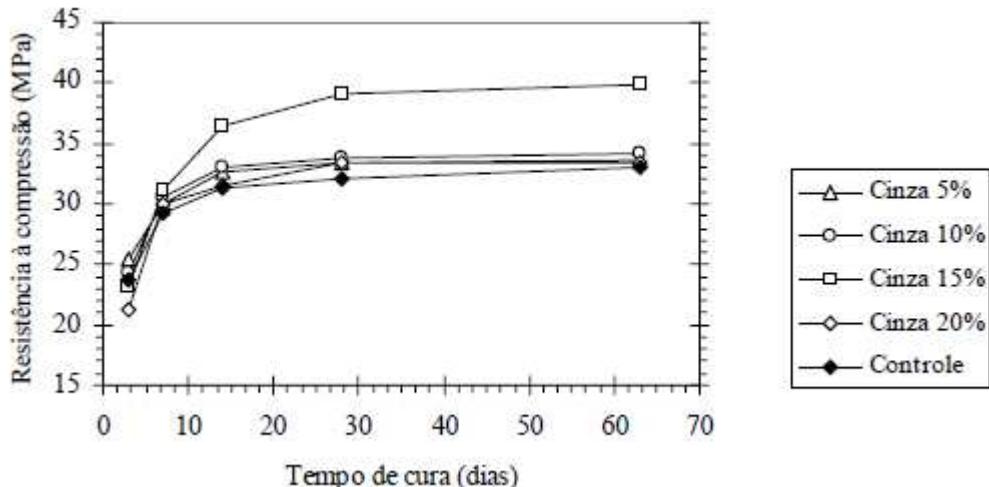


Figura 7 - Resistência à compressão de argamassas com diferentes teores de cinza do bagaço de cana-de-açúcar em substituição ao cimento *Portland* (Freitas et al., 1998).

Mesa Valenciano (1999) estudou o emprego de cinza do bagaço na confecção de pastas com cimento *Portland* para a produção de tijolos de solo-cimento. A cinza, coletada junto à Usina Furlan, localizada em Santa Bárbara D'Oeste/SP, foi submetida à moagem em moinho de bolas por 3 horas. A autora não faz referência às condições de moagem empregadas, porém a granulometria do produto apresentou somente 6,3% das partículas menores que  $75 \mu\text{m}$ . Foram ensaiadas pastas de consistência normal (ABNT NBR 7215, 1996) com substituição de até 50% de cimento por cinza do bagaço. Os resultados indicaram que a incorporação da cinza aumentou o conteúdo de água e reduziu significativamente a resistência à compressão aos 28 dias das pastas. Com relação à mistura de referência, a redução da resistência das pastas com 10%, 30% e 50% de substituição foi de 1,9%, 11,5% e 64,0%, respectivamente.

Singh et al. (2000) avaliaram a atividade pozolânica da cinza do bagaço em pastas com cimento *Portland* comum e relação água-sólidos de 0,50. A resistência à compressão da pasta composta por 10% de cinza, com relação à massa de cimento, foi 30% maior que a resistência alcançada pela pasta de referência (100% de cimento).

Secchi; Abe; Vanderlei; Nunes e Souto divulgaram no Encontro Nacional Sobre Aproveitamento de Resíduos na Construção (ENARC, 2009) resultados sobre os

efeitos da CBCA nas propriedades mecânicas do concreto. Para tanto, tomou-se como referência uma dosagem sem CBCA, denominado padrão, no qual se promoveu um gradativo acréscimo da quantidade de CBCA nas taxas de 3%, 5%, 7%, 10%, 13%, 15% e 20% em relação à massa de cimento. Como parâmetro para analisar a influência da CBCA no concreto, foi avaliado a resistência à compressão simples dos corpos-de-prova aos 3, 7, 14 e 28 dias de cura. Como resultado, constatou-se que a substituição de até 20% do cimento pela cinza do bagaço da cana-de-açúcar não houve alterações significativas na resistência à compressão dos concretos estudados, porém, para a taxa de 10% verificou-se aumento de 12% na resistência à compressão.

A cinza utilizada na pesquisa citada acima foi colhida na Usina Santa Terezinha, localizada no Município de Iguatemi-PR. Foi utilizada a CBCA no estado “*in natura*”, ou seja, nas mesmas condições que a CBCA sai das caldeiras após sua queima. A análise granulométrica da CBCA foi realizada através de peneiramento manual, utilizando-se para tanto a sequência de peneiras 0,30mm, 0,15mm, 0,075mm e fundo. Os resultados dos ensaios de granulometria e de resistência à compressão simples encontram-se na figura 8 e na tabela 4, respectivamente.

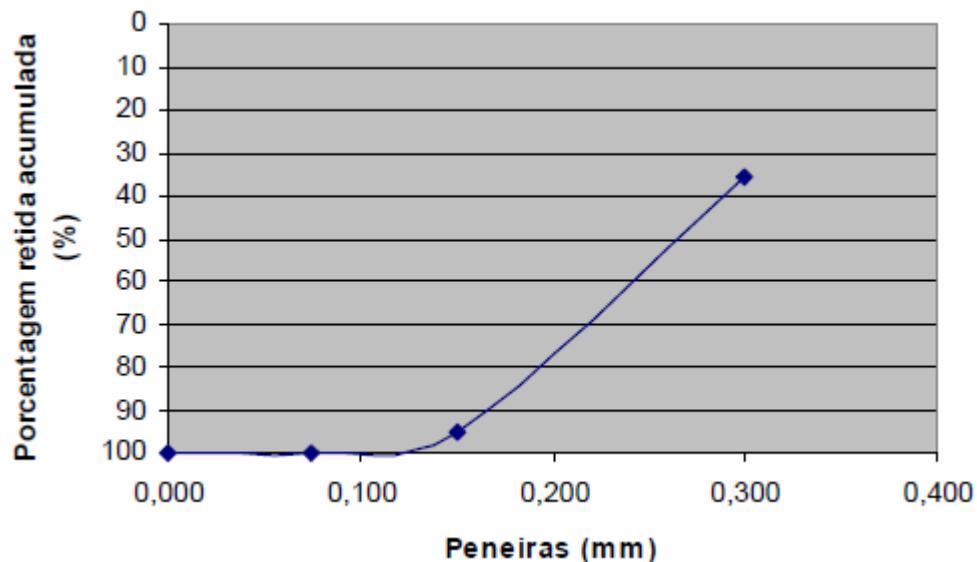


Figura 8 - Granulometria da CBCA realizada na pesquisa de Secchi; Abe; Vanderlei; Nunes e Souto (2009)

Tabela 4 - Resultados dos ensaios de compressão simples

% de CBCA	$f_c$ (MPa)			
	Idade dos CP's			
	3 dias	7 dias	14 dias	28 dias
0% (Referência)	17,2	21,9	29,9	32,8
3%	17,6	24,5	27,5	32,8
5%	16,9	20,5	29,0	31,0
7%	20,3	26,0	29,9	34,7
10%	21,5	23,0	28,0	36,7
13%	21,4	26,7	36,0	34,1
15%	18,0	21,5	26,8	31,5
20%	19,3	25,0	33,4	32,8

Fonte: Autor (2013), adaptado de ENARC (2009)

Lima; Sales; Moretti e Santos (2010) analisaram a resistência mecânica ao substituir o agregado miúdo pela CBCA em componentes para infra-estrutura urbana. As amostras de CBCA foram coletadas na Usina Diamante, na cidade de Jaú (CBCA-J); Usina Tamoio, na cidade de Araraquara (CBCA-A); Usina da Serra, na cidade de Ibaté (CBCA-I); e Usina da Barra, na cidade de Barra Bonita (CBCA-B). A CBCA foi retirada das caldeiras a altas temperaturas e foi necessário algum tempo para que a cinza esfriasse ao ar livre, lentamente. Foram utilizados teores variados de cinza, variando desde 10 até a 100% de substituição dos agregados pela CBCA. Os resultados que os autores chegaram foram que as amostras confeccionadas com 20% de CBCA-A e com 30% de CBCA-J alcançaram resultados 28% e 34% acima do exemplar de referência, respectivamente, na idade de 28 dias. A utilização do teor de 50% da cinza coletada em Jaú (CBCA-J) também apresentou resultado satisfatório, com valor 32% acima do exemplar de referência.

Martins e Machado (2009) ao utilizarem CBCA com diferentes teores como agregado miúdo em argamassas perceberam que para a idade de 28 dias, até aproximadamente 50% de CBCA em substituição à areia, houve um aumento na resistência à compressão simples das argamassas. Essa constatação pode ser explicada pelo fato das partículas de CBCA serem menores que as de areia e promover o efeito *filler*, ou seja, há um melhor empacotamento entre as partículas. Para substituições maiores que 50%, houve uma diminuição na resistência à compressão simples, pelo fato das partículas de CBCA absorverem mais água que as

de areia e ser necessário um maior volume de água ( $a/c = 0,60$ ) para hidratação dessas partículas e consequentemente deixando a argamassa mais porosa.

Souto (2010) realizou um trabalho que explorou o efeito da CBCA, “in natura”, com teores de adição variando entre 05 e 30% em concretos de classe C30. A CBCA foi avaliada através de ensaios físicos, como distribuição granulométrica e determinação do índice de vazios e módulo de finura da cinza; sendo verificada a sua composição através de ensaios de macronutrientes. Nos concretos, foram realizados ensaios mecânicos em corpos-de-prova sendo verificada a resistência à compressão axial, tração por compressão diametral e módulo de deformação. Os números demonstraram resultados significativos nos ensaios de resistência à compressão axial para índices de até 20% de substituição em massa de areia, sendo registrados ganhos de até 12% em comparação ao concreto de referência, mesmo com o aumento acentuado no fator  $a/c$ . A figura 9 retrata uma análise comparativa entre as resistências à compressão obtidas nas idades de 03, 07 e 28 dias.

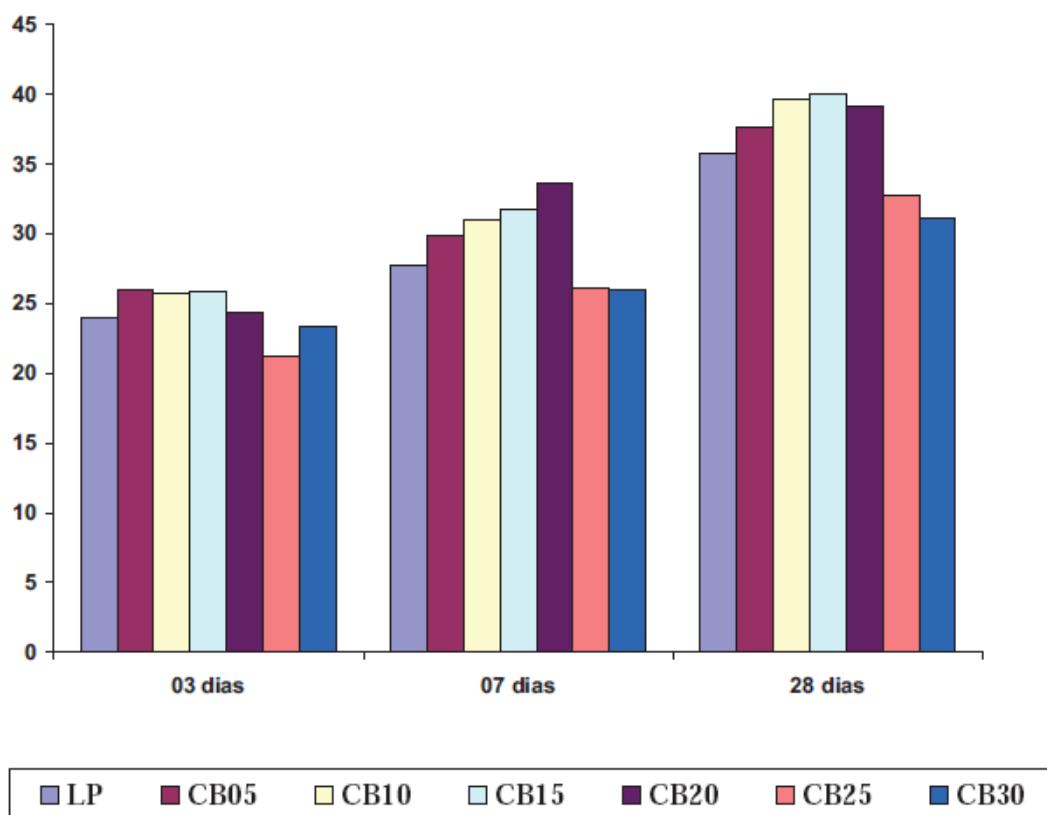


Figura 9 - Comparação entre as resistências à compressão nas três idades (SOUTO, 2010)

Observando a figura 7, percebe-se que o aumento no fator a/c não influenciou negativamente nos resultados obtidos nas amostras com até 20% de CBC, podendo ser justificado pela característica da cinza empregada nesta pesquisa. Para Petrucci (1998), os materiais com características de *filler*, no qual se enquadra a cinza residual estudada, promovem o preenchimento dos poros existentes na zona de transição do concreto, elevando a sua compacidade e consequentemente a resistência à compressão axial do mesmo. Nas amostras com adições de 25 e 30% de cinza de bagaço de cana-de-açúcar, observou-se o decréscimo da resistência a compressão. Embora não se tenha realizado ensaios complementares, uma possível causa pode ser atribuída: o aumento significativo da quantidade de água em relação à massa de cimento empregada ocasionou o aumento tanto no volume de incidência como nas dimensões dos poros (MEHTA e MONTEIRO, 2008).

Os estudos desenvolvidos indicam que a cinza residual do bagaço de cana-de-açúcar apresenta composição química adequada ao emprego como aditivo mineral, principalmente no que se refere aos teores de dióxido de silício e perda ao fogo. Entretanto, a distribuição granulométrica variável da cinza, própria de um sistema de obtenção sem qualquer classificação, aponta para a necessidade de moagem para elevar a reatividade, pelo aumento da superfície específica das partículas, e conferir maior homogeneidade ao material (CORDEIRO, 2006). Por fim, Lima, Sales, Moretti e Santos (2010) afirmam que o uso de CBCA substituindo o agregado miúdo ou cimento *Portland* é viável, desde que também seja investigada a durabilidade dos materiais (concretos e argamassas) para que se possam estabelecer melhores parâmetros de utilização.

## 2.4. Avaliação da emissão de CO<sub>2</sub> em concretos

Cordeiro (2006) quantificou os valores de emissão de CO<sub>2</sub>, associados ao processo de produção de cimento *Portland* no Brasil através da metodologia do Painel Intergovernamental de Mudanças Climáticas (IPCC, 1997; IPCC, 2000; TOLEDO FILHO *et al.*, 2001). Neste caso, o total de CO<sub>2</sub> emitido pode ser calculado pela adição de duas parcelas. A primeira parcela refere-se ao processo de calcinação do carbonato de cálcio, principal constituinte das rochas calcárias, enquanto a segunda comprehende o CO<sub>2</sub> emitido durante o processo de queima de combustíveis fósseis utilizados durante a fabricação do cimento *Portland*.

O emprego de CBCA em substituição parcial ao cimento possibilitou reduções significativas nos valores de emissão como indicado na tabela 5.

Tabela 5 - Emissão de CO<sub>2</sub> associada à produção de concretos (kg/t)

Classificação	Concreto convencional		Concreto de alto desempenho	
	Referência	Ternária (40%)	Referência	Ternária (40%)
Emissão pela descarbonatação	81,6	49,0	100,8	62,0
Emissão pelos combustíveis	44,4	26,6	54,7	33,7
CO <sub>2</sub> retido na pozolana	-	12,0	-	15,2
Emissão total	126,0	63,6	155,5	80,4

Fonte: Autor (2013), adaptado de Cordeiro (2006)

Os resultados dos cálculos de emissão de dióxido de carbono revelaram que a substituição de 40% de cimento pelas cinzas ultrafinas do bagaço da cana-de-açúcar proporcionou redução de 50% na quantidade total de CO<sub>2</sub> para o concreto de resistência convencional. Para o concreto de alto desempenho, a redução gerada pelo mesmo teor de substituição de cimento é igual a 48% (CORDEIRO, 2006).

O IPCC, por onde Cordeiro se baseou para quantificar a emissão de CO<sub>2</sub>, é o principal organismo científico internacional de avaliação das mudanças climáticas, tendo sido estabelecido e apoiado pela Organização das Nações Unidas para o Ambiente e pela Organização Meteorológica Mundial (Organismos das Nações Unidas), sendo composto por mais de 250 cientistas de vários países com o objetivo de fornecer uma visão científica sobre o estado atual da mudança do clima e suas potenciais consequências ambientais e socioeconômicas (IPCC, 2007b).

As orientações do IPCC sobre métodos de estimar as emissões são divididos em três níveis chamados de *tiers*, que variam de acordo com o detalhamento e dos dados disponíveis para o estudo. Os métodos são compostos por especificações matemáticas, informações sobre fatores de emissão ou outros parâmetros para o uso na geração de estimativas. Para processos de produção relacionados à construção civil, dez setores explicitados na tabela 6 são selecionados e analisados criteriosamente.

Tabela 6 - Setores da construção civil analisados pelo método do IPCC

Setores importantes para estimar emissões de CO <sub>2</sub> na construção civil	
Transporte	Ferro, aço e coque metalúrgico
Cimentício	Produção de cal
Cerâmico	Vidreiro
Madeireiro	Alumínio
Emissões estacionárias	Emissões fugitivas

Fonte: Autor (2013), adaptado de IPCC (2007)

Segundo Costa (2012), não havia um método integrado, adaptado a realidade brasileira, capaz de quantificar as emissões de CO<sub>2</sub> geradas pelas etapas de extração de matérias primas, produção e transporte de materiais utilizados na construção civil. Então, este pesquisador, através de metodologias internacionais e artigos científicos de associações e fabricantes, propôs um Método para a Quantificação das Emissões de CO<sub>2</sub> (Método QE-CO<sub>2</sub>).

A fórmula geral do Método QE-CO<sub>2</sub> consiste na multiplicação da quantidade de produto utilizado na obra pelo fator de perda e pelo somatório das emissões geradas pelo consumo de energia e pelo transporte. A fórmula é apresentada na equação 1:

$$Emissões_{MT1,j} = QT_j \cdot FP_j \cdot (Emissões_{TR1,i} + Emissões_{EN1,i}) \quad Eq. 1$$

onde:

$Emissões_{MT1,j}$  = emissões de CO<sub>2</sub> devido a utilização do produto j em edificações, em toneladas de CO<sub>2</sub>;

$QT_j$  = quantidade de produto j necessário na obra, em toneladas;

$FP_j$  = fator de perda do produto j, adimensional;

$Emissões_{TR1,i}$  = emissões de CO<sub>2</sub> devido ao consumo de energia i para o transporte de matérias primas e do produto j para a edificação, em toneladas de CO<sub>2</sub> / tonelada de produto j;

$Emissões_{EN1,i}$  = emissões de CO<sub>2</sub> devido ao consumo de energia i para extração e processamento do produto j necessário na edificação, em toneladas de CO<sub>2</sub> / tonelada de produto j.

Ainda de acordo com Costa (2012), essa fórmula geral do Método QE-CO<sub>2</sub> é adaptada para cada material de construção com o objetivo de levar em consideração as particularidades dos materiais, de seus sistemas produtivos e da qualidade dos dados disponíveis. Dessa forma, o Método QE-CO<sub>2</sub> é subdividido em três níveis de precisão de estimativas de CO<sub>2</sub> geradas por cada material analisado: Nível Básico, Nível Intermediário e Nível Avançado. O Nível Básico é baseado em dados médios, a nível nacional, produzindo estimativas de emissões de CO<sub>2</sub> menos precisas enquanto o Nível Avançado, por empregar dados específicos das unidades fabris sobre os processos produtivos, é o método mais preciso.

### **3. MATERIAIS E MÉTODOS**

Neste capítulo são apresentadas as metodologias utilizadas para caracterizar os materiais empregados na pesquisa. Sempre que possível, recorreu-se ao uso de ensaios normalizados, que serão descritos de forma resumida. A presente investigação foi conduzida no Centro de Tecnologia da Universidade Federal do Rio de Janeiro e contou com a infraestrutura do Laboratório de Estruturas e Materiais do Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil da COPPE/UFRJ (LabEST/PEC/COPPE/UFRJ).

Serão expostos os detalhes da coleta e caracterização das cinzas residuais do bagaço de cana-de-açúcar. Também são apresentadas as características físicas e químicas dos materiais complementares utilizados na confecção dos concretos, como cimento *Portland*, agregado miúdo (areia) e agregado graúdo (brita).

#### **3.1. Produção da cinza do bagaço de cana-de-açúcar**

A cinza do bagaço da cana-de-açúcar (CBCA) utilizada nesta pesquisa foi obtida diretamente da Usina Sucroalcooleira Coagro Cooperativa Agroindustrial do Estado do Rio de Janeiro Ltda. em Campos dos Goytacazes – RJ. A Coagro foi criada em 2002 por membros da ASFLUCAN (Associação Fluminense dos Plantadores de Cana) com apoio municipal (Campos - RJ) que preocupados com o expressivo fechamento de usinas na região, com a crescente evasão de mão de obra e com a queda da produção de cana, partiram em busca de uma alternativa para salvar a produção de cana-de-açúcar no Estado do Rio de Janeiro.

Com o início das operações na usina, foram gerados mais de 1500 empregos diretos e milhares de outros empregos indiretos, reduziu-se o custo de produção e de colheita da matéria-prima de seus associados e deu condições a seus cooperados de obterem produtividades e resultados compatíveis com seus custos. Atualmente a Coagro tem em seu quadro social mais de 9.800 cooperados, é a maior produtora de Etanol e Açúcar-Cristal do Estado do Rio de Janeiro, moendo o equivalente a 953 mil toneladas de cana-de-açúcar, produzindo 1,3 milhões de sacos de Açúcar-Cristal e 26,5 milhões de litros de Etanol ([www.coagro.coop.br](http://www.coagro.coop.br), acessado em 05/01/2013).

Uma vista aérea da usina é apresentada na figura 10.



Figura 10 - Usina Sucroalcooleira Coagro em Campos, RJ  
Fonte: <http://www.coagro.coop.br/> (acessado em 05/01/2013)

O bagaço gerado durante a extração do caldo é geralmente consumido para produção de energia por meio da co-geração através da queima em caldeiras, tornando a usina autossustentável energeticamente. Durante essa queima, são obtidas as cinzas do bagaço da cana que, por sua vez, são preparadas de modo a homogeneizar o material. A figura 11 salienta parte desse processo.



(a)



(b)

Figura 11 - caminhões carregados de cana-de-açúcar com as caldeiras ao fundo (a) e a geração do bagaço durante extração do caldo (b)  
Fonte: Autor (2011)

A homogeneização é justificada pela observação de uma grande quantidade de areia misturada à cinza. Essa areia é proveniente das lavouras e não deve ter sido totalmente removida durante a etapa de lavagem dos colmos da cana, no início do processo industrial. Esse fato também foi observado por Cordeiro (2006). Além disso,

homogeneizar a cinza contribui para retirar possíveis pedaços de bagaço com combustão incompleta.

As cinzas em estudo foram secadas ao sol para reduzir parcialmente sua umidade (Figura 12a). Em seguida, uma secagem em estufa a 110°C foi feita de modo a preparar o material para o processo de moagem (Figura 12b). Foram moídos 2,4kg de cinza a 5000RPM por vez durante 4 horas em um moinho de bolas localizado no laboratório de Engenharia da UENF (Figura 12c). Como última etapa desse processo essa cinza foi levada a uma indústria para homogeneizar a queima ficando no forno por mais 10 dias, completando a etapa de preparo do material.

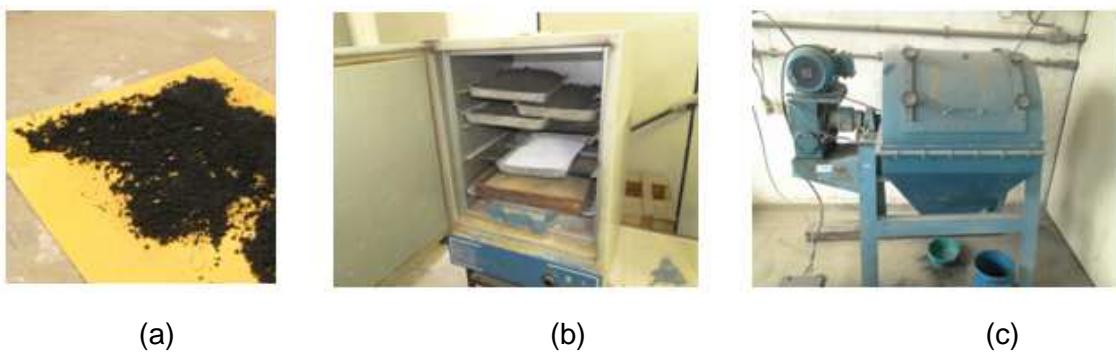


Figura 12 - Secagem ao sol (a), secagem em estufa (b) e moinho de bolas (c)  
Fonte: Araújo (2011)

Depois dos processos de secagem e moagem, a cinza foi utilizada nas moldagens realizadas em laboratório que serão apresentadas na sequência do trabalho. O resultado dessa preparação pode ser vista na figura 13.

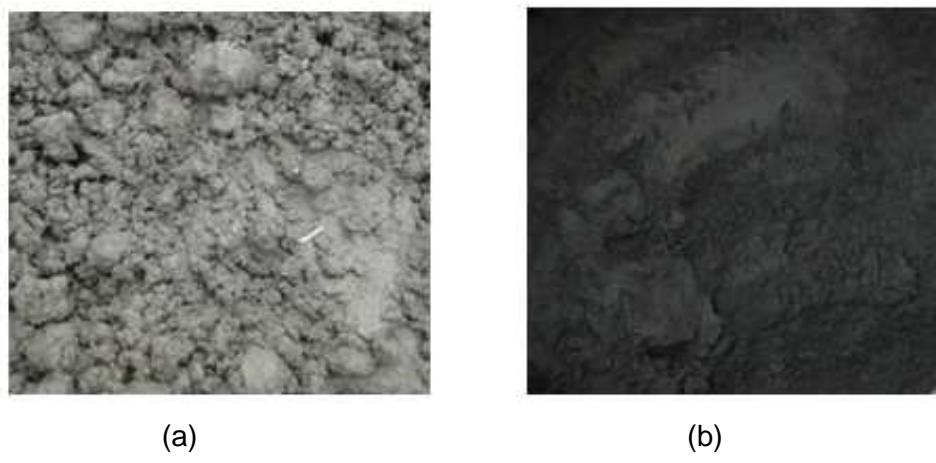


Figura 13 - cinza antes da secagem e moagem (a); cinza após secagem e moagem (b)  
Fonte: Araújo (2011)

Em função da temperatura no interior do salão da caldeira (600°C – 800°C) e do tempo de exposição ao calor, são geradas cinzas residuais com diferentes colorações. A cor é indicativa do grau de calcinação a que o bagaço foi submetido e,

consequentemente, do seu teor de carbono (CORDEIRO, 2006). Sendo assim, a cinza preta utilizada nesta pesquisa foi proveniente de um processo de combustão incompleto.

### 3.2. Ensaios para caracterização de materiais

Todos os materiais utilizados nesta pesquisa cumprem as especificações da ABNT (Associação Brasileira de Normas Técnicas), são facilmente encontrados no mercado e foram utilizados nas mesmas condições em que são empregados usualmente na construção civil.

#### 3.2.1. Cinza do bagaço da cana-de-açúcar

##### 3.2.1.1 Massa específica

A massa específica da CBCA utilizada na produção dos concretos foi determinada através de um picnômetro (Figura 14). Trata-se de um equipamento de fácil manuseio e com boa aferição. Os resultados são apresentados na tabela 7.



Figura 14 - Picnômetro utilizado para obtenção da massa específica  
Fonte: Autor (2012)

Tabela 7 - Massa específica da CBCA

Material	Massa específica (g/cm <sup>3</sup> )	Desvio padrão (g/cm <sup>3</sup> )
CBCA	2,4149	0,0017

Fonte: Autor (2012)

### 3.2.1.2 Composição granulométrica

A curva granulométrica da cinza foi obtida por meio do ensaio de granulometria a laser, através do equipamento *Malvern* (Figura 15). Tal curva é apresentada na figura 16. Nota-se que 90% dos grãos são inferiores a  $30 \mu\text{m}$ .



Figura 15 - *Malvern*: granulômetro a laser  
Fonte: Autor (2012)

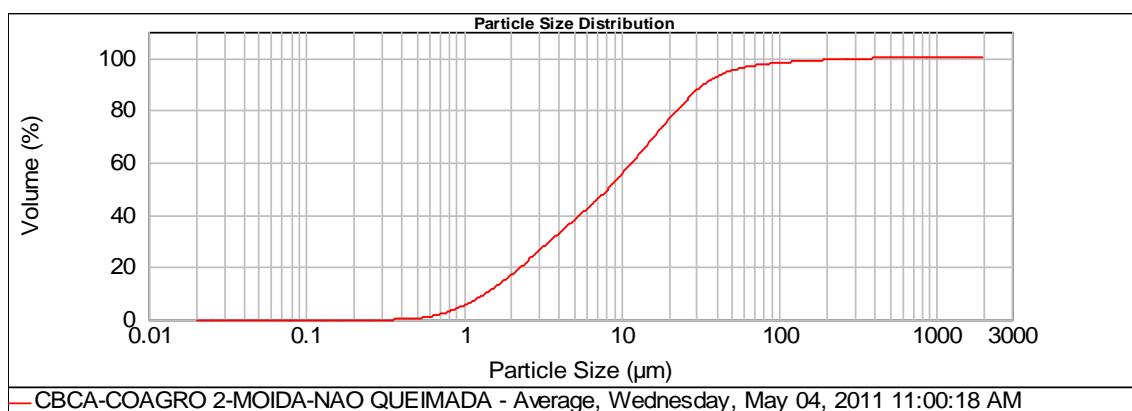


Figura 16 - Curva granulométrica da cinza do bagaço da cana-de-açúcar  
Fonte: Araújo (2011)

### 3.2.1.3 Compacidade experimental

A compacidade experimental de um material pode ser definida como um valor característico de empacotamento das partículas. Esta é uma propriedade importante

para a dosagem pelo Método de Empacotamento Compressível (MEC), utilizado neste trabalho que será visto no item 3.3.1.

Para partículas com dimensões inferiores a  $100 \mu\text{m}$ , a compacidade experimental é determinada através do ensaio de demanda d'água. Esse ensaio tem por objetivo a obtenção de uma pasta no ponto de saturação, cujas partículas encontram-se no máximo empacotamento, obtido pela adição de uma determinada quantidade de água (VELASCO, 2008). O misturador utilizado no ensaio é apresentado na figura 17.



Figura 17 - Misturador usado no ensaio de demanda d'água  
Fonte: Autor (2012)

Inicia-se com a adição de 350g do material na cuba do misturador e uma pequena quantidade de água a uma velocidade baixa por 1 minuto. Daí em diante, são realizadas adições sucessivas de água com o misturador na velocidade alta até a obtenção do ponto de demanda d'água. A massa de água necessária para tal ponto ( $m_a$ ) é, então, utilizada no cálculo da compacidade experimental através da equação 2 (VELASCO, 2008).

$$c = \frac{1}{1 + \gamma \cdot \frac{m_a}{m}} \quad Eq. 2$$

Onde:  $c$  = compacidade experimental;

$\gamma$  = massa específica do material;

$m_a$  = massa de água;

$m$  = massa do material

A massa de água adicionada foi de 242,6g. Com a massa específica da CBCA já determinada, chegou-se ao resultado apresentado na tabela 8.

Tabela 8 - Compacidade experimental da CBCA

Material	Compacidade experimental
CBCA	0,374

Fonte: Autor (2012)

### 3.2.1.4 Composição química

A composição química da CBCA foi estudada por Cordeiro (2006) através de análises químicas semi-quantitativas (espectrometria de fluorescência de raios X). Vale lembrar que, na pesquisa de Cordeiro, o tratamento da cinza foi realizado de maneira diferente (mais moída e mais queimada). Porém, independente das condições de tratamento, é importante colocar que a cinza apresenta o dióxido de silício como principal composto químico. O resultado da análise é ilustrado na tabela 9.

Tabela 9 - Composição química da CBCA

Classificação	Composição (%), em massa
	Cinza do bagaço de cana-de-açúcar
SiO <sub>2</sub>	64,44
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	< 0,10
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,10
CaO	6,33
Na <sub>2</sub> O	0,74
K <sub>2</sub> O	9,57
MnO	0,51
TiO <sub>2</sub>	< 0,01
MgO	9,27
BaO	< 0,16
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	8,84

Fonte: Cordeiro (2006)

### 3.2.1.5 Índice de atividade pozolânica

A fim de verificar a capacidade pozolânica da CBCA em estudo, foi necessário determinar o IAP (Índice de Atividade Pozolânica) deste material. Trata-se de uma propriedade importante, pois indica se esta cinza conseguirá reagir da maneira esperada com o hidróxido de cálcio presente no cimento *Portland*.

Barroso (2011) utilizou essa cinza nas mesmas condições de produção e tratamento do material estudado nesta pesquisa e, através da NBR 5752 (1992), determinou seu IAP. O resultado obtido indicou um IAP para a Cinza de 72%. O valor de índice mínimo estipulado pela NBR 12653 (1992) para que um material possa ser classificado como pozolana é de 75%. Portanto, a cinza utilizada ficou muito próxima desse valor, mas não poderia ser classificada como pozolana considerando a respectiva norma.

## 3.2.2. Cimento *Portland*

### 3.2.2.1 Resistência

O cimento utilizado nesse estudo foi o cimento *Portland* CP II-F-32 usado para aplicações em geral, desde o início ao final da obra. Trata-se de um produto de baixo teor de adição, composto por fíler calcário (teor entre 6 e 10%), que garante ao produto resistências iniciais superiores e uniformidade em sua coloração escura.

A resistência do cimento foi determinada de acordo com a NBR 7215/1996 - "Cimento *Portland* - Determinação da resistência à compressão", para as idades de 1, 3, 7 e 28 dias. Foram usados 5 corpos-de-prova cilíndricos de 50 mm de diâmetro e 100 mm de altura para cada idade. O misturador utilizado no ensaio foi o mesmo apresentado na figura 17. Foi feita uma média com as resistências de cada corpo-de-prova, obtendo, assim, os resultados apresentados na tabela 10 e o gráfico da figura 18 que mostra a evolução da resistência do cimento com a idade.

Tabela 10 - Resistência à compressão do cimento

Idade (dias)	Resistência à compressão - CPII-F-32 (MPa)
1	7,96
3	17,65
7	23,47
28	31,93

Fonte: Colimodio (2012)

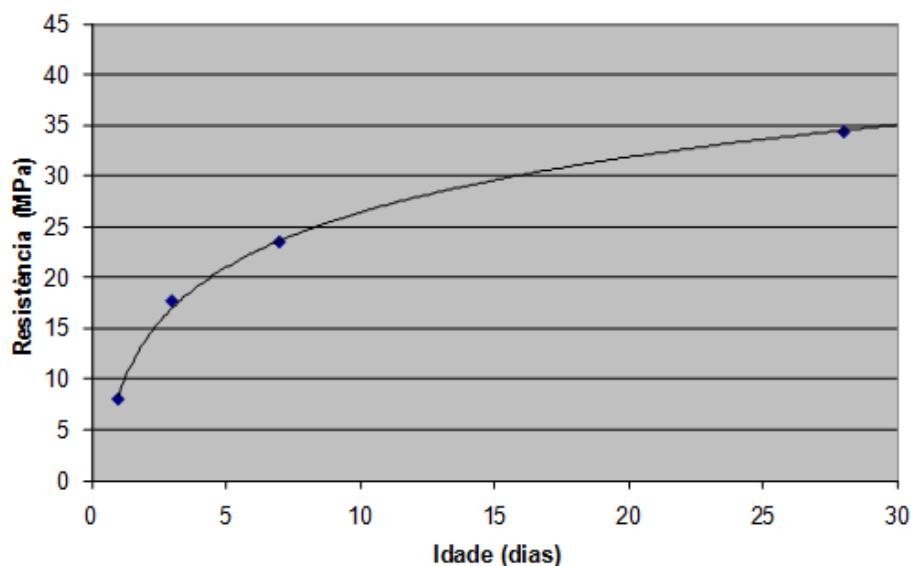


Figura 18 - Evolução da resistência do cimento  
Fonte: Colimodio (2012)

Percebe-se que o resultado obtido para a idade de 28 dias é compatível com a resistência nominal dada pelo fabricante.

### 3.2.2.2 Massa específica

A massa específica do cimento foi determinada de modo semelhante ao realizado com a CBCA explicada no item 3.2.1.1. O resultado é apresentado na tabela 11.

Tabela 11 - Massa específica do cimento

Material	Massa específica (g/cm <sup>3</sup> )	Desvio padrão (g/cm <sup>3</sup> )
Cimento	3,1860	0,0021

Fonte: Autor (2012)

### 3.2.2.3 Composição granulométrica

A granulometria do cimento foi obtido por meio do equipamento *Malvern* e é apresentado na figura 19. Percebe-se que quase a totalidade das partículas são menores que 100  $\mu$  m.

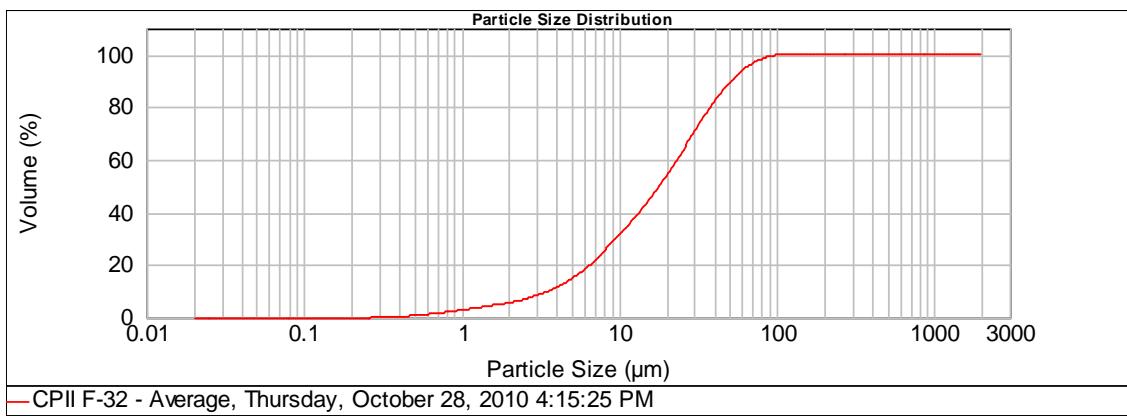


Figura 19 - Curva granulométrica do cimento  
Fonte: Colimodio (2012)

### 3.2.2.4 Compacidade experimental

A compacidade do cimento também foi estabelecida através do ensaio de demanda d'água. Seu resultado é expresso na tabela 12.

Tabela 12 - Compacidade do cimento

Material	Compacidade experimental
Cimento	0,536

Fonte: Autor (2012)

## 3.2.3. Agregados

### 3.2.3.1 Massa específica

A massa específica para a areia utilizada na produção dos concretos em estudo foi determinada através da utilização do frasco de *Chapman*, ensaio normalizado pela NBR 9776/1987. O frasco de *Chapman* foi preenchido com um determinado volume de água. Uma amostra de areia foi pesada e colocada no frasco. Feito isso, imprimiu-se movimentos de vaivém a fim de remover o ar ainda presente na amostra. Então, leu-se o volume final de água e agregado no frasco. O volume da amostra de agregado é igual a diferença entre os volumes inicial e final, assim a massa específica é determinada através da relação entre a massa e a diferença dos volumes.

Já a massa específica da brita usada foi determinada na tese de Velasco (2008), sendo obtida de acordo com os procedimentos da NBR NM 53/2003. Os valores encontrados para o agregado miúdo (areia) e graúdo (brita) encontram-se na tabela 13.

Tabela 13 - Massa específica da areia e brita

Material	Massa específica (kg/m <sup>3</sup> )
Areia	2625
Brita	2650

Fonte: Autor (2012)

### 3.2.3.2 Composição granulométrica

A composição granulométrica dos agregados utilizados foi determinada conforme a NBR 7217/1987. Através dos resultados foi possível classificar as partículas de uma amostra pelos respectivos tamanhos e medir as frações correspondentes a cada tamanho extraindo valores que auxiliarão nos estudos de dosagem do concreto, tais como a determinação do módulo de finura que indicará possíveis variações de superfície nos agregados, e da dimensão máxima característica.

As configurações dos ensaios para determinação da composição granulométrica da areia e das britas são apresentadas, respectivamente, nas figuras 20a e 20b.



(a)



(b)

Figura 20 - Configuração do ensaio para determinação da composição granulométrica da areia (a) e para determinação da composição granulométrica das britas (b)

Fonte: Autor (2011)

Os resultados são apresentados, para a areia, brita zero e brita 1, respectivamente, nas tabelas 14, 15 e 16.

Tabela 14 - Composição granulométrica da areia

Malha (mm)	m(g)		% simples		% acumulada	
	M1	M2	M1	M2	M1	M2
6,3	0	0	0	0	0	0
4,8	0	5	0	1,03	0	1,03
2,4	15	20	3,06	4,12	3,06	5,15
1,2	95	70	19,39	14,43	22,45	19,59
0,6	175	160	35,71	32,99	58,16	52,58
0,3	150	170	30,61	35,05	88,78	87,63
0,15	45	55	9,18	11,34	97,96	98,97
Fundo	10	5	2,04	1,03	100	100
<b>Dimensão máxima característica (em mm):</b>					2,4	
<b>Módulo de finura (médio):</b>					2,68	

Fonte: Colimodio (2012)

Tabela 15 - Composição granulométrica da brita 0

Malha (mm)	m(g)		% simples		% acumulada	
	M1	M2	M1	M2	M1	M2
12,5	0	0	0	0	0	0
9,5	300	340	2,88	2,98	2,88	2,98
6,3	4700	5820	45,11	51,05	47,98	54,04
4,8	3000	3120	28,79	27,37	76,78	81,4
2,4	1860	1740	17,85	15,26	94,63	96,67
1,2	140	140	1,34	1,23	95,97	97,89
0,6	120	60	1,15	0,53	97,12	98,42
0,3	100	60	0,96	0,53	98,08	98,95
0,15	80	40	0,77	0,35	98,85	99,3
Fundo	120	80	1,15	0,7	100	100
<b>Dimensão máxima característica (em mm):</b>					9,5	
<b>Módulo de finura (médio):</b>					5,7	

Fonte: Colimodio (2012)

Tabela 16 - Composição granulométrica da brita 1

Malha (mm)	m(g)		% simples		% acumulada	
	M1	M2	M1	M2	M1	M2
25	0	0	0	0	0	0
19	675	835	13,47	16,77	13,47	16,77
12,5	3570	3295	71,26	66,16	84,73	82,93
9,5	700	785	13,97	15,76	98,7	98,69
6,3	65	65	1,3	1,31	100	100
4,8	0	0	0	0	100	100
2,4	0	0	0	0	100	100
1,2	0	0	0	0	100	100
0,6	0	0	0	0	100	100
0,3	0	0	0	0	100	100
0,15	0	0	0	0	100	100
Fundo	0	0	0	0	100	100
<b>Dimensão máxima característica (mm):</b>					25	
<b>Módulo de finura (médio):</b>					7,13	

Fonte: Colimodio (2012)

### 3.2.3.3 Compacidade experimental

Por possuírem dimensões superiores a  $100 \mu m$ , a compacidade experimental para os agregados foi determinada através do ensaio de compressão com vibração, cuja configuração do experimento é exemplificada na figura 21. A descrição de tal ensaio pode ser encontrada mais detalhadamente em Velasco (2008).



Figura 21 - Configuração do ensaio de compressão com vibração  
Fonte: Autor (2011)

Os resultados obtidos para a compacidade experimental dos agregados são apresentados na tabela 17, sendo que para a brita 1 a compacidade foi determinada para três faixas granulométricas.

Tabela 17 - Compacidade experimental dos agregados

Material	Compacidade experimental
Areia	0,637
Brita zero	0,53
Brita 1	D <sub>máx</sub> ≤ 12,5 mm
	12,5 mm < D <sub>máx</sub> ≤ 19 mm
	D <sub>máx</sub> > 19 mm

Fonte: Autor (2012)

### 3.2.4. Aditivo superplasticificante

O aditivo superplasticificante adotado para esta pesquisa foi o GLENIUM 21 - BASF. Trata-se de um superplasticificante de terceira geração à base de éter policarboxílico. Por efeito da repulsão eletrostática, o superplasticificante dispersa as partículas de cimento, fazendo com que se necessite de menos água para se atingir uma dada trabalhabilidade.

O superplasticificante possui teor de sólidos de 31,2 %, massa específica de 1.073 kg/m<sup>3</sup> e pH 6,2. O método empregado para avaliar a compatibilidade e o ponto de saturação do dispersante sobre as partículas finas é o ensaio de fluidez de pastas através do uso do funil de *Marsh*. Maiores informações sobre esse ensaio pode ser encontrado em Ederli (2011).

## 3.3. Produção dos concretos

Após a etapa de caracterização dos materiais, deu-se início à produção dos concretos. Foram realizadas três misturas diferentes. Primeiramente foi gerado um concreto de referência apenas com a utilização de cimento, agregados, água e superplasticificante. Em seguida, foram produzidos concretos em que a CBCA substituía o cimento *Portland* nos teores de 20 e 40%. Tais teores foram definidos sem análises mais detalhadas por se tratar de um estudo exploratório.

### 3.3.1. Dosagem

As dosagens dos concretos foram realizadas através Método do Empacotamento Compressível (MEC). Trata-se de um método científico proposto por Larrard (1999), cuja eficiência já foi testada em diversos concretos com resistências normais, de alto desempenho, auto-adensáveis, entre outros.

O MEC apresenta uma abordagem totalmente diferenciada dos métodos tradicionais. Sua conceituação baseia-se num modelo de empacotamento de partículas para a otimização de misturas granulares buscando a máxima compacidade possível, acoplado a um conjunto de modelos de comportamento para o concreto (estado fresco e endurecido). Assim, faz-se a dosagem a partir da fração volumétrica otimizada obtida e, então, torna-se possível a predição das propriedades do concreto (LARRARD, 1999).

O fator água/cimento utilizado nas misturas foi de 0,475. A moldagem dos corpos de prova para o concreto de referência ocorreu em moldes cilíndricos de 100mm de diâmetro e 200mm de altura. Já os corpos de prova dos concretos em que se utilizou a CBCA os moldes apresentavam 75mm de diâmetro e 150mm de altura. Essa diferenciação ocorreu, pois não se dispunha de muita quantidade de cinza para a pesquisa. Sendo assim, foi necessário um volume maior para a moldagem do concreto de referência e, consequentemente, um peso maior para os materiais.

As tabelas 18, 19 e 20 apresentam, respectivamente, a massa dos materiais para as moldagens do concreto de referência, concreto com substituição de 20% do cimento *Portland* pela CBCA e concreto com substituição de 40% do cimento *Portland* pela CBCA.

Tabela 18 - Massa dos materiais para o concreto de referência

Dosagem - CR	
Material	Kg
Água	5,400
Cimento	11,400
Brita 0	4,392
Brita 1	29,499
Areia	21,000
Aditivo	0,071

Fonte: Autor (2011)

Tabela 19 - Massa dos materiais para o concreto com 20% de CBCA

<b>Dosagem - 20% CBCA</b>	
<b>Material</b>	<b>Kg</b>
Água	2,700
Cimento	4,560
Cinza Bagaço de Cana	1,140
Brita 0	2,196
Brita 1	14,750
Areia	10,500
Aditivo	0,029

Fonte: Autor (2011)

Tabela 20 - Massa dos materiais para o concreto com 40% de CBCA

<b>Dosagem - 40% CBCA</b>	
<b>Material</b>	<b>Kg</b>
Água	2,700
Cimento	3,420
Cinza Bagaço de Cana	2,280
Brita 0	2,196
Brita 1	14,750
Areia	10,500
Aditivo	0,029

Fonte: Autor (2011)

### 3.3.2. Preparo das amostras

Para a moldagem dos concretos, acontecida no Laboratório de Concretagem do LabEST, como citado foram utilizados corpos-de-prova cilíndricos com dimensões 7,5 x 15 cm (concreto com CBCA) e 10 x 20 cm (concreto de referência). Para cada mistura foram moldados 20 corpos-de-prova com o intuito de ter 5 corpos de prova para realização de ensaios mecânicos nas quatro idades definidas (1, 3, 7 e 28 dias).

Os concretos foram produzidos em sala climatizada à temperatura de (21±1)°C. Para a produção do concreto de referência, foi utilizado um misturador planetário de capacidade de 200 litros. Já as misturas dos concretos com CBCA ocorreram com auxílio de uma betoneira de 50 litros (figura 22). A sequência de procedimentos na geração dos concretos é apresentada na tabela 21.

Tabela 21 - Procedimentos para produção dos concretos

Etapa	Procedimento	Duração (segundos)
1	Mistura dos agregados	30
2	Adição dos aglomerantes	30
3	Adição de 80% da água de amassamento	120
4	Parada para raspagem da parede e das pás do misturador	30
5	Adição dos 20% restantes da água e do superplasticificante	240

Fonte: Autor (2012)



Figura 22 - Betoneira utilizada para mistura dos materiais

Fonte: Autor (2011)

A análise das propriedades do concreto no estado fresco ocorreu logo após a mistura na betoneira. Para análise das propriedades no estado endurecido foram moldados corpos-de-prova, após adensamento e vibração em três camadas através de uma mesa vibratória. A figura 23 apresenta a etapa de vibração e adensamento para produção do concreto com 20% de CBCA.



Figura 23 - Vibração e adensamento do concreto

Fonte: Autor (2011)

Os corpos de prova foram retirados dos moldes após 24 horas, sendo então identificados e levados à câmara úmida (Figura 24) onde permaneceram até a data dos respectivos ensaios. A cura aconteceu com temperatura de  $(21\pm1)^\circ\text{C}$  e umidade relativa de 100%. De lá, saíram para serem capeados (Figura 25) com pasta de enxofre para garantia da planicidade e paralelismo entre as bases e perpendicularidade ao cilindro.



Figura 24 - Câmara úmida onde se deu a cura dos concretos  
Fonte: Autor (2011)



Figura 25 - Corpos-de-prova com a camada de pasta de enxofre para a regularização  
Fonte: Autor (2011)

Percebe-se na figura 25, uma coloração mais escura por parte dos concretos em que foi utilizada a CBCA em relação ao concreto de referência. Esse fato, conforme já fora explicado, é devido ao processo de combustão sofrido pela cinza no interior da caldeira durante a etapa de produção da mesma.

### 3.4. Ensaio com o concreto no estado fresco

Foi realizado o ensaio de abatimento de tronco de cone, também conhecido com *slump*, que tem como objetivo medir a consistência e a fluidez do material, permitindo que se controle a uniformidade do concreto. No Brasil este ensaio é regulamentado pela NBR NM67 (1998). O ensaio consiste basicamente no preenchimento de um tronco de cone em três camadas de igual altura, sendo em cada camada dados 25 golpes com uma haste padrão. O valor do abatimento é a medida do adensamento do concreto logo após a retirada do molde cônico.

A principal função deste ensaio é fornecer uma metodologia simples e convincente para se controlar a uniformidade da produção do concreto em diferentes betonadas. Desde que, na dosagem, se tenha obtido um concreto trabalhável, a constância do abatimento indicará a uniformidade da trabalhabilidade (GEYER, 2006).

A configuração do ensaio e a medição do abatimento de tronco de cone são ilustradas na figura 26.

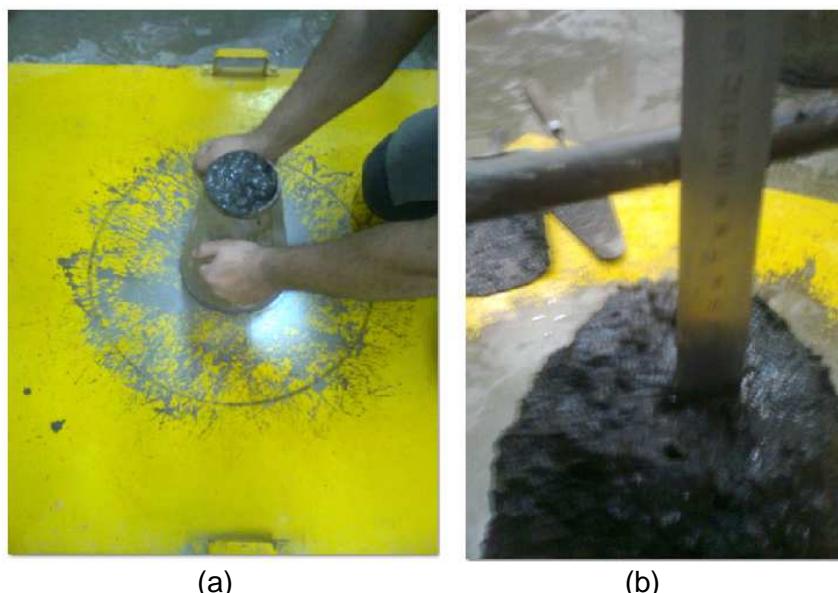


Figura 26 - Configuração do ensaio de abatimento de tronco de cone (a) e medição do abatimento (b)  
Fonte: Autor (2011)

### **3.5. Ensaios mecânicos**

O papel da resistência mecânica dos materiais nos projetos de engenharia é de fundamental importância. Embora na presente pesquisa o macro objetivo seja a produção de concreto com baixo impacto ambiental, o comportamento mecânico dos concretos também foi investigado através da evolução da resistência à compressão e da resistência à tração por compressão diametral nas quatro idades definidas.

#### **3.5.1. Resistência à compressão**

Dos 5 corpos-de-prova por idade destinados ao ensaio mecânico, 3 deles sofreram ruptura por compressão simples em uma prensa servo-controlada *Shimadzu*, modelo UH-F 1000kN (Figura 27) ocorrida Laboratório de Ensaios Mecânicos do LabEST, de acordo com as prescrições da NBR 5739 (1994) com velocidade de carregamento de 0,2 mm/min.



Figura 27 - Prensa Shimadzu servo-controlada, modelo UH-F 1000 kN  
Fonte: Autor (2011)

O comportamento tensão versus deformação foi obtido com emprego de transdutores elétricos para medição dos deslocamentos longitudinais. Além disso, foi calculado o módulo de elasticidade para cada corpo de prova rompido. O cálculo foi feito considerando apenas o trecho linear elástico inicial. A configuração do ensaio de resistência à compressão é ilustrada na figura 28.

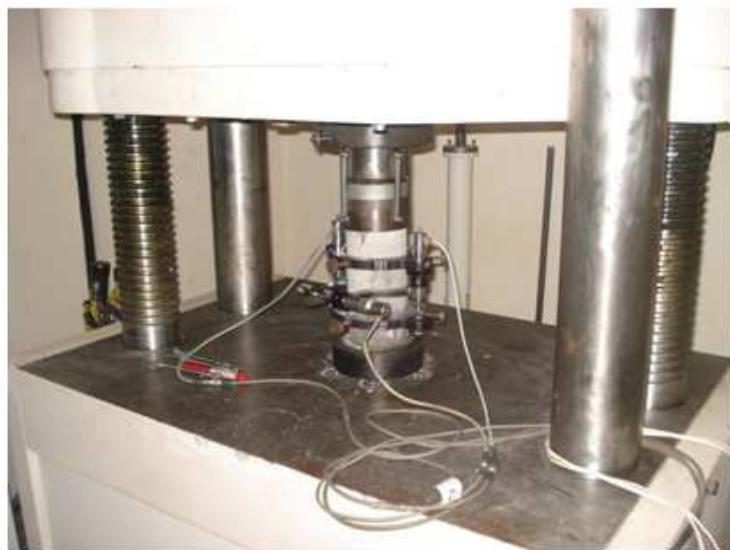


Figura 28 - Configuração do ensaio mecânico de compressão axial para o concreto de referência  
Fonte: Autor (2011)

### 3.5.2. Resistência à tração por compressão por diametral

A resistência à tração é uma importante propriedade mecânica dos concretos e permite estimar a carga à qual ocorre fissuração em uma estrutura. A ausência de fissuração é extremamente importante para manutenção da continuidade do concreto e, em muitos casos, para prevenção de fenômenos de deterioração (NEVILLE, 1997; CORDEIRO, 2006).

O ensaio de compressão diametral baseado na NBR 7222 (1994) apresenta-se como alternativa para se estimar a resistência à tração devido à facilidade de execução. O ensaio consiste, basicamente, na aplicação de um carregamento compressivo ao longo de duas geratrizessituadas em um mesmo plano diametral no corpo-de-prova cilíndrico. Determina-se a carga de ruptura que ocorre quando se inicia a abertura de fratura neste plano diametral em decorrência da geração de um estado de tensões biaxiais na região do plano que contém a carga aplicada.

Para este experimento, foram separados dois corpos-de-prova por idade, sendo estes divididos ao meio, totalizando 4 pequenos cilindros que sofrerão o ensaio. Também se fez uso da prensa *Shimadzu*, de modo que os corpos-de-prova foram posicionados com o auxílio de ripas de madeira. Uma amostra do corpo-de-prova após o ensaio é ilustrada na figura 29.



Figura 29 - Corpo-de-prova após ensaio  
Fonte: Autor (2011)

Os resultados que serão apresentados no próximo capítulo, foram obtidos através da aplicação das tensões registradas durante o ensaio na equação 3, a qual determina a resistência à tração por compressão diametral.

$$f_{tD} = \frac{2 \cdot F}{\pi \cdot d \cdot L} \quad Eq. 3$$

Onde:  $f_{tD}$  = resistência a tração por compressão diametral (MPa);

$F$  = carga máxima obtida no ensaio (kN);

$d$  = diâmetro do corpo-de-prova (mm);

$L$  = altura do corpo-de-prova (mm).

## 4. APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS

O propósito do presente capítulo é apresentar e analisar os resultados dos ensaios realizados e caracterizados no capítulo anterior. Primeiramente é apresentado a propriedade do concreto em seu estado fresco. Em seguida foram analisados os resultados de resistência à compressão, curva tensão-deformação e resistência à tração por compressão diametral dos concretos produzidos com os dois diferentes níveis de adições de CBCA.

### 4.1. Análise das propriedades do concreto fresco

Foi observado durante o preparo das amostras de concreto uma interferência razoável da CBCA no abatimento do concreto, tendo como consequência um concreto mais pastoso quanto maior o teor de CBCA. Em geral, pode-se afirmar que os concretos desenvolvidos apresentaram trabalhabilidade e coesão adequados para a moldagem dos corpos de provas. Não foi observada a ocorrência de exsudação ou segregação dos materiais.

A figura 30 apresenta os resultados do ensaio de abatimento de tronco de cone. Percebe-se que o valor de abatimento para a mistura com 20% de CBCA mantém-se próximo a faixa estabelecida para o concreto de referência, ao passo que o concreto com 40% de CBCA apresentou um abatimento bem superior aos outros.

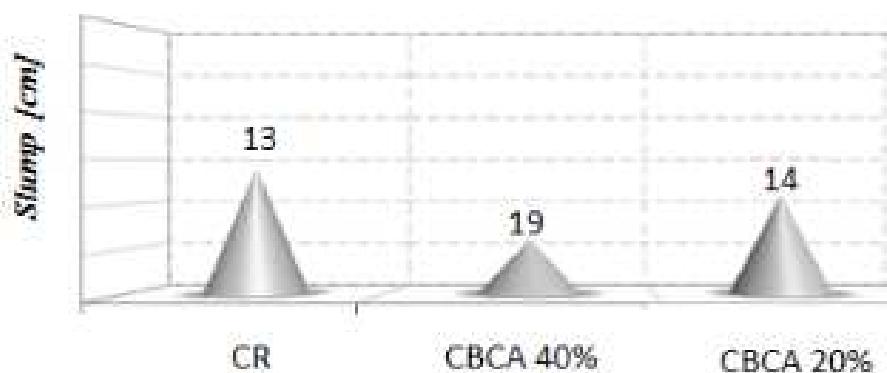


Figura 30 - Resultado do ensaio de abatimento de tronco de cone em cm  
Fonte: Autor (2012)

Pode-se dizer que a plasticidade do concreto melhorou ao aumentar o teor de cinza. Nesse caso, não necessitaria nem fazer uso do aditivo, pois só com a inserção da própria cinza já foi adquirida uma boa trabalhabilidade. O correto seria manter a mesma consistência para ambos os concretos, variando apenas a adição de superplastificante, mas como se trata de um estudo exploratório não houve essa preocupação.

## **4.2. Comportamento mecânico dos concretos**

### **4.2.1. Resistência à compressão axial**

A tabela 22 e a figura 31 apresentam os resultados dos ensaios de resistência à compressão. Na tabela também é mostrado o coeficiente de variação obtido entre as amostras aos 03, 07 e 28 dias. Os valores foram obtidos através de uma média entre os corpos-de-prova rompidos, descartando-se aquele resultado cujo coeficiente de variação fosse maior que 10% a fim de dispor de maior confiabilidade nas análises.

Na primeira idade, não foi possível a realização do ensaio de compressão para a mistura com 40% CBCA, uma vez que não conseguiu-se desmoldar os corpos-de-prova devido a fluidez ainda existente no concreto. Este fato demonstra que quanto maior o teor de CBCA presente na mistura, maior é o retardo no tempo de pega do concreto.

Para o concreto de referência foi obtido uma resistência ao primeiro dia de 14,52 MPa, enquanto que o concreto com 20% CBCA atingiu uma resistência de apenas 1,59 MPa, fato que comprova o que foi mostrado em estudos anteriores que a influência da CBCA na resistência do concreto não ocorre de maneira imediata e se acentua ao longo do tempo.

Tabela 22 - Resistência à compressão dos concretos com 03, 07 e 28 dias

3 dias			7 dias			28 dias		
Mistura	fc (MPa)	CV (%)	Mistura	fc (MPa)	CV (%)	Mistura	fc (MPa)	CV (%)
CR	25,1	2,70	CR	28,42	1,16	CR	33,56	1,04
20% CBCA	9,92	9,63	20% CBCA	15,75	8,25	20% CBCA	25,26 *	-
40% CBCA	8,48	4,16	40% CBCA	17,66	6,53	40% CBCA	24,5	2,30

\* Dados referentes a apenas um corpo-de-prova

Fonte: Autor (2012)

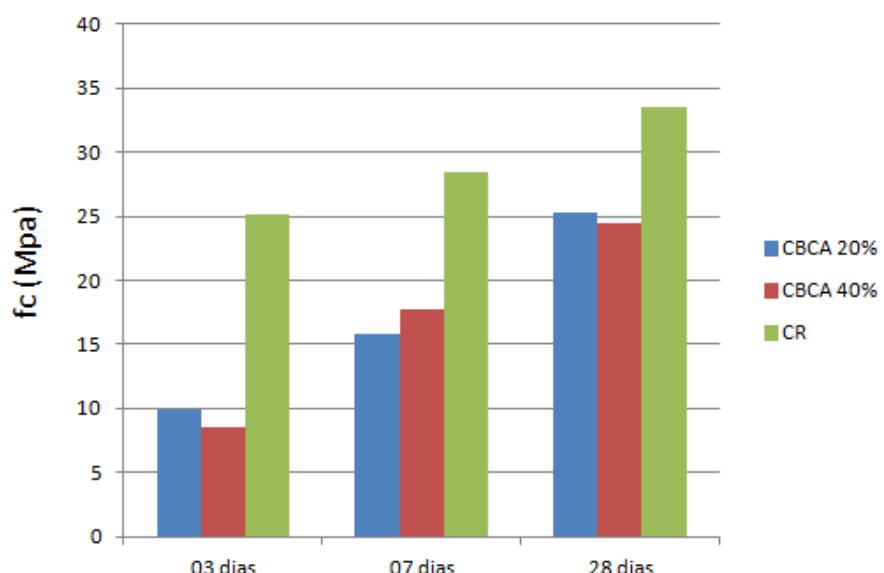


Figura 31 - Comparaçao da resistencia à compressão dos concretos  
Fonte: Autor (2012)

Aos 28 dias, a mistura com 20% de CBCA apresenta um pouco mais de 75% da resistência atingida pelo concreto de referêcia na mesma idade, já o concreto com 40% de CBCA esse indicativo foi de 73%. O fato da CBCA e o cimento serem materiais que apresentam diferentes tensões superficiais pode ter contribuído para este resultado. Apesar disso, é possível afirmar que houve uma interação física entre os componentes do concreto, isto é, ocorreu um empacotamento das partículas existentes..

A evolução da resistência à compressão é ilustrada na figura 32 e permite uma melhor avaliação a respeito do comportamento do concreto endurecido ao longo do tempo determinando-se as taxas de crescimento das resistências à compressão axial.

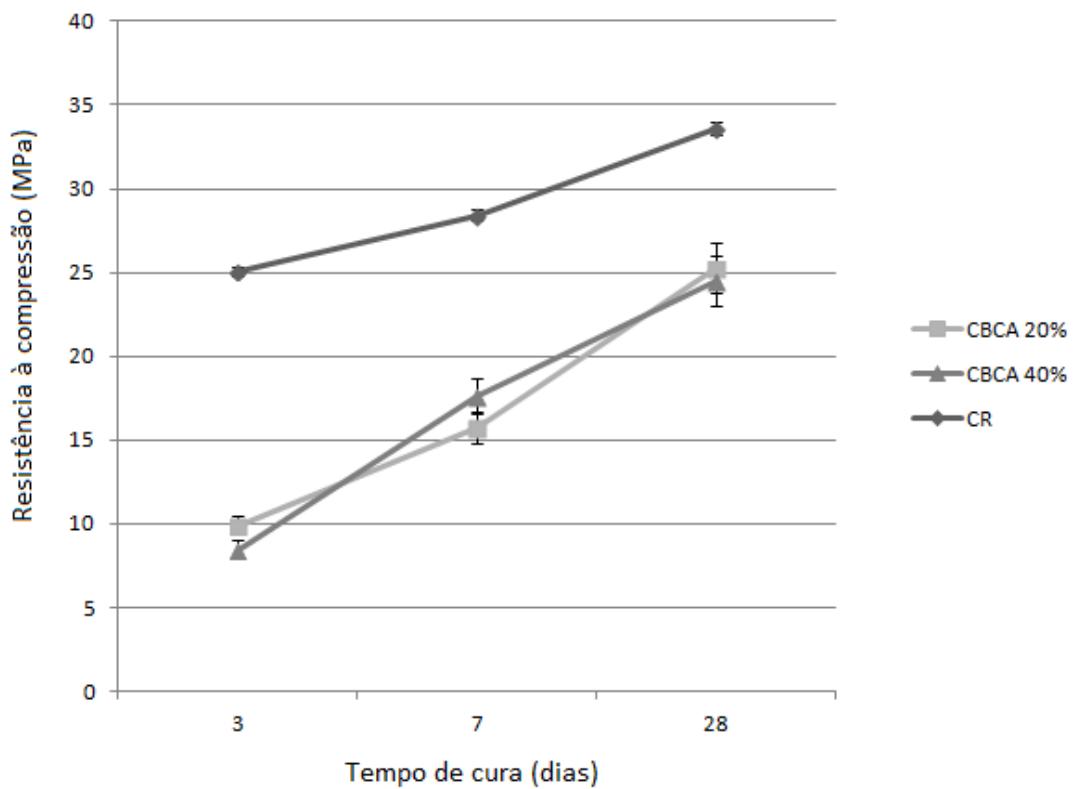


Figura 32 - Evolução da resistência à compressão axial ao longo do tempo  
Fonte: Autor (2012)

É possível perceber, através da inclinação da reta compreendida entre 07 e 28 dias, que a taxa de crescimento da resistência do concreto com 20% de CBCA foi superior em relação a mistura com teor de 40% de CBCA. De posse deste resultado e com base nas revisões bibliográficas realizadas, pode-se concluir que há uma redução da resistência à compressão axial, ao longo do tempo, à medida que o teor de cinza do bagaço de cana-de-açúcar aumenta.

Com relação ao concreto de referência, as duas misturas com CBCA apresentam valores de resistência significativamente inferiores, em todas as idades avaliadas. A expectativa é que ao serem realizados experimentos em idades mais avançadas, essa discrepância seja minimizada. De qualquer forma, a baixa atividade pozolânica da cinza em questão é, provavelmente, a principal responsável por um comportamento mecânico inferior à mistura de referência.

Essa baixa atividade pozolânica está intimamente ligada ao tratamento em que a cinza foi submetida durante sua produção. Como já fora citado, o bagaço foi queimado apenas uma vez em caldeira e a cinza foi moída por somente 4 horas, ao passo que em outros estudos este tratamento é feito de forma a obter uma cinza bem mais queimada e moída, já que dessa maneira sua reatividade é elevada. Optou-se por

essa situação com o objetivo de diminuir o consumo energético durante a fase de produção.

A análise das taxas de crescimento das resistências à compressão axial entre o 7º e o 28º dia apresentaram oscilações nos valores, dificultando a elaboração de uma curva de tendências. Na Figura 33 são apresentadas as porcentagens referentes aos indicadores, sendo visualizada a variação dos resultados.

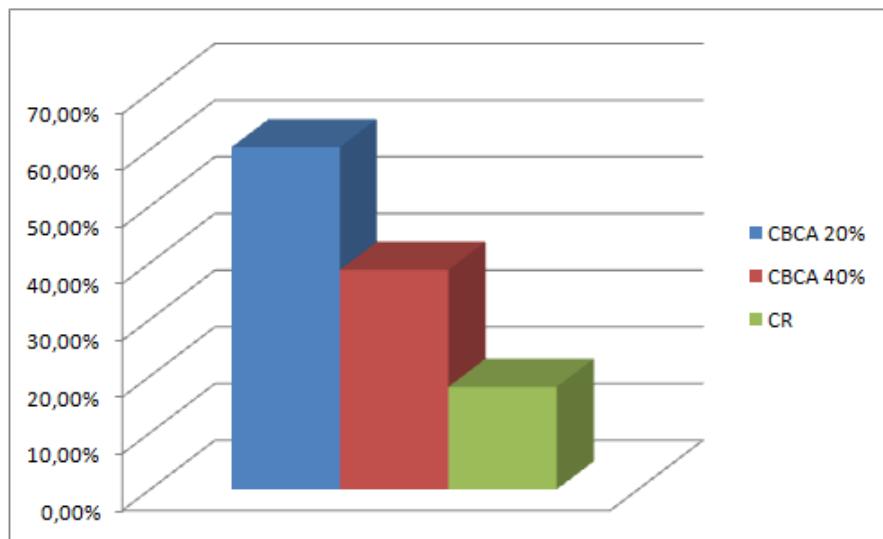


Figura 33 - Taxa de crescimento da resistência entre as idades de 07 e 28 dias  
Fonte: Autor (2012)

O gráfico anterior apenas ratifica que o concreto de referência atinge boa parte de sua resistência total logo no início de seu período de cura e, por isso, sua taxa de crescimento entre as idades citadas é menor em relação as misturas contendo CBCA. Além disso, percebe-se que o concreto com 20% de CBCA foi o que obteve maior taxa de crescimento de resistência.

#### 4.2.2. Resistência à tração por compressão diametral

Os ensaios de resistência à tração por compressão diametral foram realizados nas idades de 03, 07 e 28 dias para os concretos com 20% e 40% de CBCA. Os resultados com as tensões e seus respectivos coeficientes de variação encontram-se na tabela 23. Além disso na tabela também é explicitado a razão entre a resistência à tração e a resistência à compressão.

Segundo Mehta e Monteiro (1994), a resistência à tração depende do nível geral de resistência à compressão e quanto maior for a resistência à compressão axial, menor será a relação entre estas duas propriedades. Sendo assim, a relação entre a

resistência à tração ( $f_t$ ) e a resistência à compressão ( $f_c$ ), aos 28 dias, é de 11-13% para o concreto de baixa resistência, 8-10% para o concreto de média resistência e de 7% para o concreto de alta resistência.

Tabela 23 - Resistência à tração por compressão diametral

Mistura	3 dias			7 dias			28 dias		
	$f_t$ (MPa)	CV (%)	$f_t/f_c$	$f_t$ (MPa)	CV (%)	$f_t/f_c$	$f_t$ (MPa)	CV (%)	$f_t/f_c$
20% CBCA	1,656	4,38	0,167	2,264	8,77	0,144	3,237	3,87	0,128
40% CBCA	1,119	2,23	0,132	2,112	8,54	0,120	2,744	4,23	0,112

Fonte: Autor (2012)

Ainda de acordo com Mehta e Monteiro (2008), a grande variação entre a resistência a compressão e a resistência a tração nos concretos se deve a grande quantidade de cristais de hidróxido de cálcio, podendo estes, serem reduzidos através da adição de materiais pozolanicos. Desta forma, este índice servirá para a análise do comportamento da CBCA na zona de transição do concreto.

A evolução da resistência à tração nas idades estudadas e a relação entre a resistência à tração e a resistência à compressão ao longo do tempo são ilustradas respectivamente nas figuras 34 e 35.

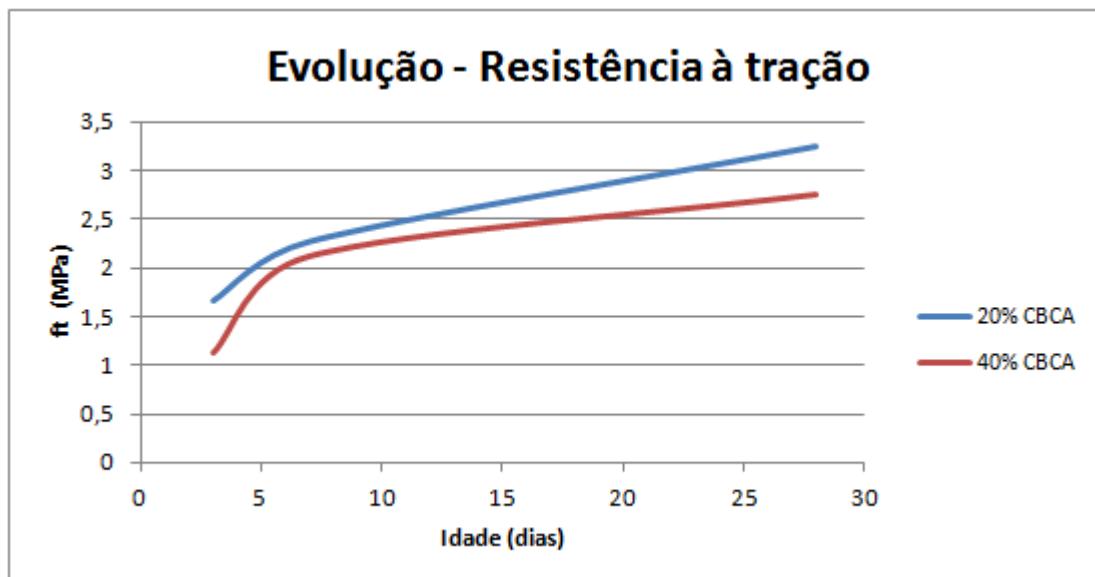


Figura 34 - Evolução da resistência à tração por compressão diametral  
Fonte: Autor (2012)

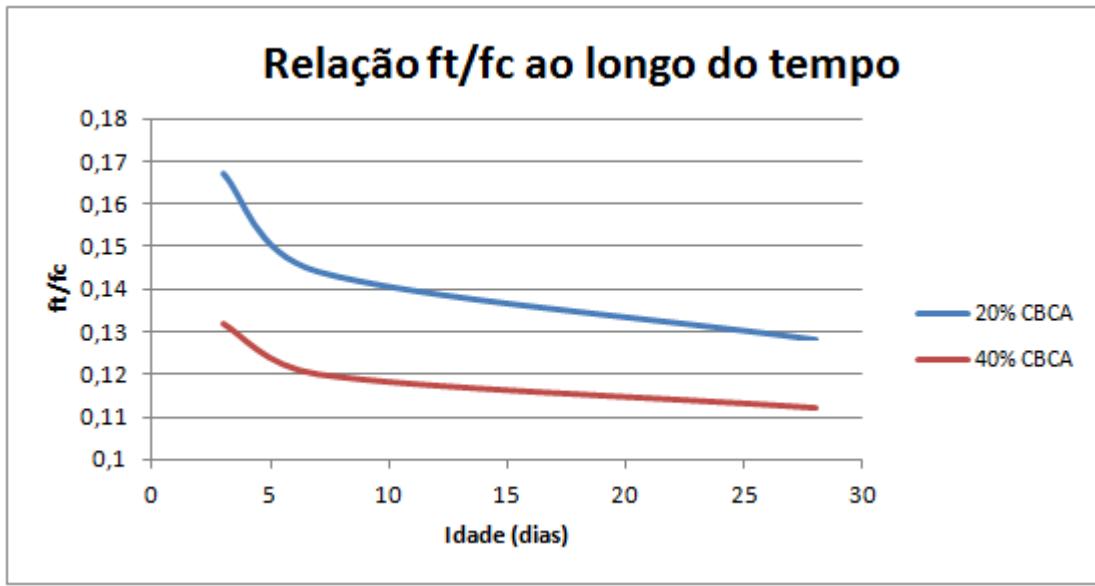


Figura 35 - Razão entre a resistência à tração e a resistência à compressão

Fonte: Autor (2011)

A razão entre a resistência à tração e a resistência à compressão ao 28º dia ficou em 12,8% para a mistura com 20% de CBCA e 11,2% para a mistura com 40% de CBCA, o que mostra uma coerência dos resultados, já que estão dentro do intervalo proposto por Mehta e Monteiro (2008).

Entretanto, para verificar a real existência de atividade pozolânica nos concretos era necessário dispor dos resultados de resistência à tração do concreto de referência, o que não foi possível devido a problemas ocorridos durante a pesquisa. Mehta e Monteiro (2008) ainda afirmam que as diferenças entre os valores de resistência à compressão e a tração são menos acentuadas quando na presença de materiais com atividade pozolânicas.

Para Nunes (2009), a cinza de bagaço de cana-de-açúcar não possui índice de atividade pozolânica significativo, porém o mesmo não elimina a possibilidade da existência de reações entre a CBCA e o cimento Portland, quanto ao consumo de hidróxido de cálcio.

#### 4.2.3. Módulo de elasticidade

Aos 28 dias, os módulos de elasticidade dos concretos foram obtidos baseados na NBR 8522 (2003). Sendo assim, o comportamento tensão *versus* deformação foi obtido com emprego de transdutores elétricos (LVDT) para medição dos

deslocamentos longitudinais, acoplados à região central dos corpos-de-prova, conforme ilustrado na figura 36.

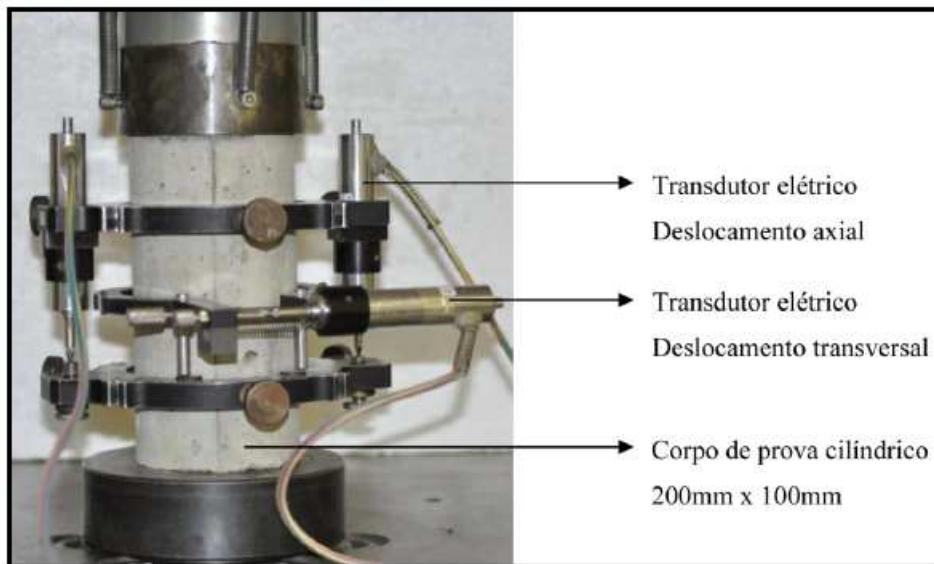


Figura 36 - Transdutores elétricos durante o ensaio de compressão  
Fonte: Grabois (2012)

Segundo a norma citada, a curva tensão *versus* deformação permite o cálculo do módulo de elasticidade a partir da equação 4. Tais curvas foram obtidas apenas para o concreto de referência e o concreto com 40% de CBCA na idade de 28 dias e são apresentadas na figura 37.

$$E = \frac{\sigma_2 - \sigma_1}{\varepsilon_2 - \varepsilon_1} \quad Eq. 4$$

onde:

$E$  = módulo de elasticidade;

$\sigma_2$  = tensão de compressão correspondente a 40% da carga última;

$\sigma_1$  = tensão de compressão correspondente à deformação axial,  $\varepsilon_1$ , de  $5 \cdot 10^{-5}$ ;

$\varepsilon_1$  = deformação axial igual a  $5 \cdot 10^{-5}$ ;

$\varepsilon_2$  = deformação axial produzida pela tensão  $\sigma_2$ .

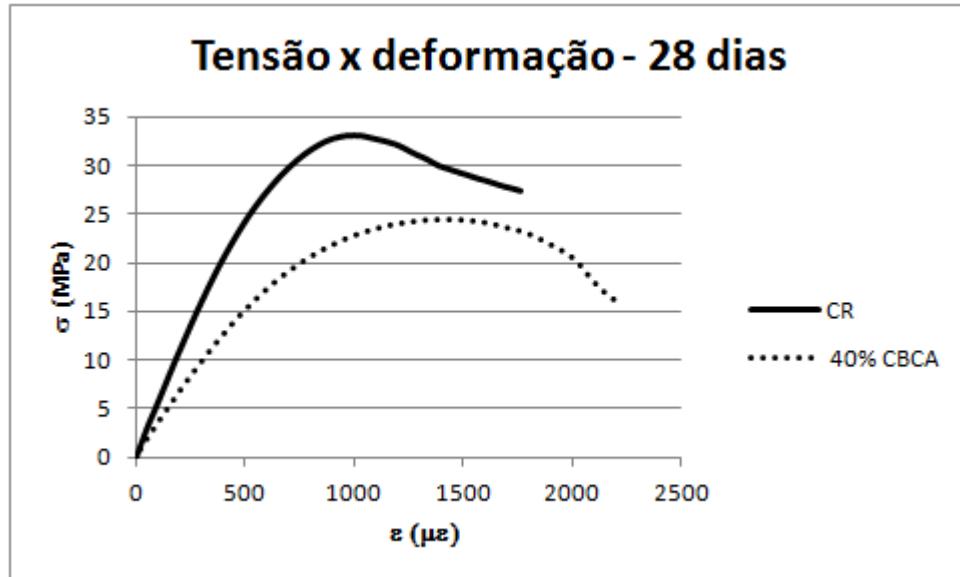


Figura 37 - Curva tensão versus deformação aos 28 dias

Fonte: Autor (2013)

Os resultados encontrados para o módulo de elasticidade são apresentados na tabela 24.

Tabela 24 - Módulo de elasticidade aos 28 dias

Mistura	Módulo de Elasticidade (GPa)
CR	45,83
40% CBCA	31,47

Fonte: Autor (2013)

Quando não forem feitos ensaios e não existirem dados mais precisos sobre o concreto usado na idade de 28 dias, pode-se estimar o valor do módulo de elasticidade usando a equação 5, conforme a NBR 6118 (2007):

$$E_{ci} = 5600 \cdot \sqrt{f_{ck}} \quad Eq. 5$$

onde:

$E_{ci}$  = estimativa do módulo de elasticidade (MPa);

$f_{ck}$  = resistência à compressão do concreto aos 28 dias (MPa).

Por meio dessa equação foram calculados os valores estabelecidos pela NBR 6118 (2007) e constatou-se que todos os valores obtidos em ensaio ficaram acima dos valores estabelecidos pela referente norma, como pode ser visto na tabela 25.

Tabela 25 - Comparaçāo dos módulos de elasticidade entre as normas NBR 8522 / NBR 6118

Concretos	Módulo de elasticidade (GPa)		Relação NBR 8522 / NBR 6118
	NBR 8522	NBR 6118	
CR	45,83	33,56	1,37
40% CBCA	31,47	24,50	1,28

Fonte: Autor (2013)

Conforme os resultados apresentados, a incorporação no teor de 40% de CBCA no concreto substituindo parcialmente o cimento *Portland*, de um modo geral, acarretou decréscimo no valor absoluto do módulo de elasticidade em comparação ao concreto de referência. Além disso, os valores de deformação de pico (deformação referente à tensão máxima) são equivalentes a 980  $\mu\epsilon$  e de 1410  $\mu\epsilon$  para os concretos de referência e de 40% de CBCA, respectivamente.

## **5. EXEMPLO DE ESTIMATIVA DE EMISSÃO DE CO<sub>2</sub> EM EDIFICAÇÃO RESIDENCIAL**

### **5.1. Método utilizado**

O presente capítulo tem como objetivo estimar o benefício ambiental proporcionado pela utilização da cinza do bagaço da cana de açúcar (CBCA) em concretos de cimento *Portland*. Este é um estudo de fundamental importância diante do cenário atual onde se preza cada vez mais a sustentabilidade construtiva.

Será feita uma estimativa das emissões de CO<sub>2</sub> para construção de uma edificação residencial unifamiliar empregando em um primeiro momento o concreto de referência analisado nesta pesquisa e em uma segunda análise os outros concretos estudados ao longo deste trabalho, substituindo parte do cimento *Portland* pela CBCA. Deste modo, será possível avaliar de maneira mais clara o ganho ecológico trazido por essa substituição.

O meio escolhido para tal estimativa chama-se Método para Quantificação das Emissões de CO<sub>2</sub> (Método QE-CO<sub>2</sub>) desenvolvido por Costa (2012), já citada na revisão bibliográfica presente na pesquisa, que leva em consideração as emissões de dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) geradas pelas etapas de extração de matérias primas, processamento e transporte dos materiais empregados na construção civil.

Dentre os três níveis de precisão de estimativas do método, o nível utilizado foi o Nível Básico. Tal nível é calculado de acordo com a equação 1 (fórmula geral do Método QE-CO<sub>2</sub>) quando somente estão disponíveis valores médios sobre consumo de energia, transporte e/ou composição química dos materiais. Quando não se conhece ao certo essas variáveis, bem como local de extração, produção e consumo ou o tipo de meio de transporte utilizado, devemos empregar a equação 6:

$$Emissões_{MT,j} = QT_j \cdot FP_j \cdot FEP_j \quad Eq. 6$$

onde:

QT<sub>j</sub> = quantidade de produto j necessária na obra, em toneladas;

FP<sub>j</sub> = fator de perda do produto j, adimensional;

FEP<sub>j</sub> = fator de emissão de CO<sub>2</sub> devido a utilização do produto j em edificações, em toneladas de CO<sub>2</sub> / tonelada de produto acabado.

O fator de perda de determinado material, devido a desperdícios na aplicação durante a obra foi obtido a partir de dados sobre as perdas de materiais nos canteiros de obra no Brasil e é apresentado na tabela 26. Percebe-se que para o concreto produzido na obra, esse fator de perda chega a 6% em média, índice relativamente baixo se comparado com outros materiais de construção presentes na tabela.

Tabela 26 - Indicadores globais de perda de materiais na obra, por material (%)

Identificação	Média (%)	Mínimo (%)
Aço	10	4
Alumínio (esquadria)	2	-
Areia	76	7
Argamassa parcial (fora do canteiro) - Alvenaria	116	26
Argamassa parcial (fora do canteiro) - Chapisco	21	14
Argamassa parcial (fora do canteiro) - Contrapiso	42	36
Argamassa parcial (fora do canteiro) - Emboco/massa	99	5
Argamassa parcial (fora do canteiro) - Reboco	13	13
Argamassa produzida em obra	18	18
Blocos e tijolos	17	3
Cal	97	6
Cimento	95	6
Concreto produzido em obra	6	6
Concreto usinado	9	2
Gesso	45	0
Gesso (placa acortanada)	10	-
Pedra	75	9
Placas cerâmicas	16	2
Tubos	29	0
Tubos elétrica	18	5

Fonte: Autor (2013), adaptado de Agopyan (1998); Marcondes (2007); Souza *et al.* (1998)

A relação total dos fatores de emissão FEPj para a cidade do Rio de Janeiro encontra-se no anexo 1. Os fatores são consequência das emissões geradas pelas fases de extração, processamento e transporte dos materiais de construção para a cidade. Na tabela 27 são encontrados os fatores de emissão dos materiais que serão

necessários para cálculo do fator de emissão do concreto. Os cálculos realizados para determinar esses três valores são apresentados no item 5.3.

Tabela 27 - Fatores de emissão de CO<sub>2</sub> dos materiais presentes no concreto

Identificação	Unidade	Valor
Agregados graúdos	tCO <sub>2</sub> /t produto	0,0861
Agregados miúdos	tCO <sub>2</sub> /t produto	0,0858
Cimento	tCO <sub>2</sub> /t produto	0,6518

Fonte: Autor (2013), adaptado de Costa (2012)

Além desses três materiais, é calculado no item 5.2 o fator de emissão da CBCA para estimativa do fator de emissão dos concretos utilizados no presente trabalho.

## 5.2. Fator de emissão (FEP) para cinza do bagaço da cana-de-açúcar

As etapas do processo produtivo da CBCA que emitem CO<sub>2</sub> compreendem o transporte do local em que a cinza foi gerada até o local onde ocorrerá a concretagem da obra; e a moagem da cinza que é necessária para ativar as reações químicas de aditivos minerais, além de reduzir os tamanhos das partículas conferindo maior compacidade à mistura.

Atividades como moagem da cana-de-açúcar para extração do caldo que dá origem ao bagaço e queima do bagaço como combustível em caldeiras que geram vapor d'água utilizado na produção de açúcar e álcool foram desconsideradas para cálculo do fator de emissão de CO<sub>2</sub> (FEP) da cinza, uma vez que são atividades que já seriam feitas independentemente do aproveitamento da CBCA em concretos.

### 5.2.1. Transporte

Segundo Costa (2012), as emissões de CO<sub>2</sub> em função do transporte devem ser calculadas levando-se em consideração o consumo médio de energéticos para o transporte de matérias primas e do produto acabado, como é explicitado na equação 7.

$$Emissões_{TR1} = km \cdot CO_t \cdot FEC_i \quad Eq. 7$$

sendo:

Emissões<sub>TR1</sub> = emissões de CO<sub>2</sub> em razão do transporte, em toneladas de CO<sub>2</sub>/tonelada de produto acabado;

km = distância percorrida pelo veículo no transporte de matérias e produto acabado (somatório da distância de ida mais a de volta), em km;

CO<sub>t</sub> = fator de consumo médio de energia de determinado tipo de veículo, em L/t/km;

FEC<sub>i</sub> = fator de emissão corrigido da energia i, em tCO<sub>2</sub>/L.

Para o transporte da cinza, estima-se a distância entre a Usina Sucroalcooleira em Campos dos Goytacazes no Norte Fluminense onde ocorre a produção da cinza até o centro da cidade do Rio de Janeiro em 299 km, de acordo com a interface do Google Maps (2012). Caso os caminhões retornem vazios, deve-se dobrar a distância total percorrida, totalizando 598 km.

O veículo escolhido para o transporte foi o caminhão semipesado a óleo diesel por ser indicado para médias e longas distâncias entre centros urbanos. O consumo médio de combustível deste tipo de caminhão é de 0,0196 L/t/km, enquanto que o fator de emissão corrigido do óleo diesel fica em 0,0032 tCO<sub>2</sub>/L (COSTA, 2012).

Sendo assim, utilizando a equação 7:

$$Emissões_{TR,CBCA} = 598 \cdot 0,0196 \cdot 0,0032 = 0,0375 \text{ tCO}_2 / \text{t produto}$$

Este resultado relativo às emissões de CO<sub>2</sub> em função do transporte está acima do valor encontrado (0,0237 tCO<sub>2</sub> / t produto) por Costa (2012) para cálculo do fator de emissão total do setor cimentício, o que é compreensível, uma vez que a distância entre os principais fabricantes de cimento e o centro do Rio é menor que a distância entre o local de produção da CBCA e o centro desse mesmo município.

### 5.2.2. Moagem

Para avaliar a emissão de CO<sub>2</sub> devido à moagem da CBCA, foi pressuposto de forma conservadora que o índice de trabalho para moer a cinza seja igual à moagem do clínquer. De acordo com os resultados de ensaios de moabilidade realizado por Hosten e Avsar (1998), este índice vale 13,49 kWh/t.

Trata-se de emissão indireta aquele consumo de energia elétrica utilizada no processo produtivo de algum material, de modo que o trabalho de moagem possa ser convertido em emissão de CO<sub>2</sub> através do fator de emissão de eletricidade que varia

em cada país como mostra a tabela contida no anexo 2. No Brasil, este valor é equivalente a 0,075 tCO<sub>2</sub>/MWh.

Sendo assim:

$$Emissões_{Moagem,CBCA} = 13,49 \frac{kWh}{t} \cdot 0,000075 \frac{tCO_2}{kWh} \quad \text{Eq. 8}$$

$$Emissões_{Moagem,CBCA} = 0,0010 tCO_2 / t produto$$

Este baixo valor relativo às emissões de CO<sub>2</sub> em função da moagem é justificado pela cinza utilizada na pesquisa ter sido pouco beneficiada, isto é, ter sofrido apenas uma etapa de moagem.

Portanto, o fator de emissão de CO<sub>2</sub> da CBCA pode ser expresso como a soma das emissões geradas pelo transporte e moagem da mesma:

$$FEP_{CBCA} = 0,0385$$

O fator de emissão de CO<sub>2</sub> da CBCA é bem inferior ao fator de emissão do cimento (0,6518) encontrada no anexo 1, pois todas atividades que antecedem a geração das cinzas já são feitas independentemente delas serem aproveitadas como aditivo mineral. Então, a energia consumida para tratá-la é consideravelmente menor que a energia para produção de cimento *Portland*.

### 5.3. Fator de emissão (FEP) para concretos

O fator de emissão para concretos (FEP<sub>CO</sub>) é calculado levando-se em consideração a soma das emissões totais geradas pelos processos de extração, processamento e transporte das matérias primas (cimento e agregados) e do produto acabado e a quantidade de matéria prima empregada (traço) para a produção do concreto desejado. (COSTA, 2012).

De posse dos fatores de emissão de CO<sub>2</sub> dos agregados miúdos, agregados graúdos, cimento e CBCA já conhecidos, é possível determinar o FEP<sub>CO</sub> a partir do consumo de materiais para produzir 1,00 m<sup>3</sup> de concreto. A tabela 28 apresenta os dados utilizados para a produção do concreto de referência, além dos concretos abordados no trabalho cujo cimento foi substituído pela CBCA no teor de 20% e 40%.

Tabela 28 - Fator de emissão de CO<sub>2</sub> por concreto utilizando cimento CPII-F-32

Identificação	Aditivo (kg)	Água (kg)	Cimento (kg)	Pedra (kg)	Areia (kg)	CBCA (kg)	FEP Concreto (tCO <sub>2</sub> /m <sup>3</sup> )
Concreto Referência	1,94	180	380	1129,7	700	-	0,405
Concreto 20% CBCA	1,94	180	304	1129,7	700	76	0,358
Concreto 40% CBCA	1,94	180	228	1129,7	700	152	0,312

Fonte: Autor (2013)

A equação 9 explicita como o fator FEP do concreto é determinado:

$$FEP_{CO} = \frac{FEP_{Ag,M} \cdot Q_{Ag,M} + FEP_{Ag,G} \cdot Q_{Ag,G} + FEP_{Cim} \cdot Q_{Cim} + FEP_{CBCA} \cdot Q_{CBCA}}{1000} \quad \text{Eq. 9}$$

sendo:

FEP<sub>CO</sub> = fator de emissão de CO<sub>2</sub> devido ao concreto;

FEP<sub>Ag,M</sub> = fator de emissão de CO<sub>2</sub> devido aos agregados miúdos;

Q<sub>Ag,M</sub> = quantidade de agregados miúdos presentes no concreto, em kg;

FEP<sub>Ag,G</sub> = fator de emissão de CO<sub>2</sub> devido aos agregados graúdos;

Q<sub>Ag,G</sub> = quantidade de agregados graúdos presentes no concreto, em kg;

FEP<sub>Cim</sub> = fator de emissão de CO<sub>2</sub> devido ao cimento;

Q<sub>Cim</sub> = quantidade de cimento presente no concreto, em kg;

FEP<sub>CBCA</sub> = fator de emissão de CO<sub>2</sub> devido à cinza do bagaço da cana;

Q<sub>CBCA</sub> = quantidade de cinza do bagaço da cana presente no concreto, em kg.

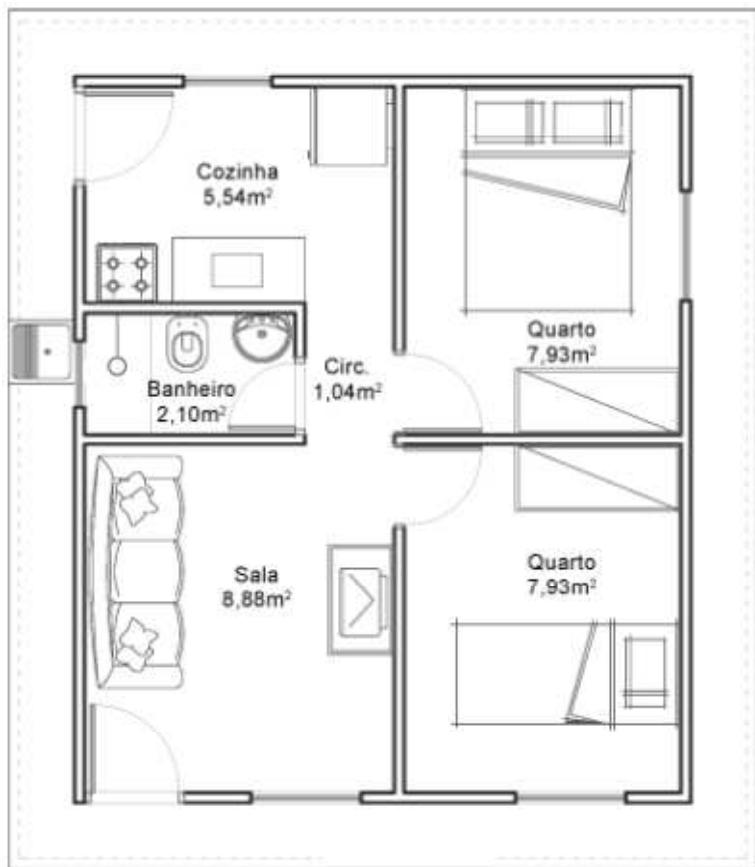
#### 5.4. Aplicação em edificação residencial

A edificação residencial escolhida para aplicação do Método QE-CO<sub>2</sub> é típica do programa Minha Casa Minha Vida (MCMV), na cidade do Rio de Janeiro. O programa MCMV pretende construir, sem prazo determinado, um milhão de moradias para a população com renda de até 10 salários mínimos (CAIXA, 2010) e faz parte do Programa de Aceleração do Crescimento (PAC) do Governo Federal Brasileiro.

A planta baixa da casa padrão adotada pela Caixa Econômica Federal em seu financiamento para o programa MCMV é composta de sala, cozinha, dois quartos,

banheiro e área externa e possui aproximadamente área de 42m<sup>2</sup> (figura 38). Sua localização encontra-se no centro da cidade do Rio de Janeiro. O sistema construtivo utilizado foi alvenaria estrutural com utilização de blocos de concreto.

Figura 38 - Planta baixa da edificação unifamiliar do estudo de caso



Fonte: CAIXA (2006)

Os materiais de construção que tiveram suas emissões de CO<sub>2</sub> estimadas foram aço, agregados, cerâmica, concreto, madeira, plástico (PVC) e vidro. Os resultados encontrados no anexo 3 foram calculados de acordo com a equação 6, com os valores da tabela 26 e do anexo 1.

Trata-se de uma adaptação da planilha desenvolvida por COSTA (2012), onde o todo item da obra em que existe concreto estrutural é primeiramente analisado com o concreto de referência e em seguida com os concretos contendo CBCA estudados ao longo deste trabalho com o objetivo de quantificar a redução na liberação do CO<sub>2</sub>. Para facilitar a compreensão dos resultados, as células da planilha correspondente a presença de concreto estrutural foram destacadas.

A tabela é fragmentada nos subsistemas existentes na construção civil tais como fundação, estrutura, esquadria, revestimento e instalações. Os materiais e suas

respectivas quantidades empregadas na obra foram obtidos a partir de dados divulgados pela Caixa. As emissões são calculadas com e sem fator de perda.

A tabela 29 e 30 a seguir apresentam, respectivamente para as emissões sem fator de perda e com fator de perda, as emissões totais de CO<sub>2</sub> de concreto na obra bem como as emissões de toda a edificação para cada uma das três simulações realizadas.

Tabela 29 - Emissões de CO<sub>2</sub> devido ao uso do concreto e total da edificação sem considerar o fator de perda

	Emissões sem fator de perda		
	Emissão devido ao concreto (tCO <sub>2</sub> )	Emissão total da edificação (tCO <sub>2</sub> )	Influência do concreto na emissão total
Concreto Referência	2,178	7,518	28,97%
Concreto 20% CBCA	1,928	7,267	26,53%
Concreto 40% CBCA	1,677	7,016	23,90%

Fonte: Autor (2013)

Tabela 30 - Emissões de CO<sub>2</sub> devido ao uso do concreto e total da edificação sem considerando o fator de perda

	Emissões com fator de perda		
	Emissão devido ao concreto (tCO <sub>2</sub> )	Emissão total da edificação (tCO <sub>2</sub> )	Influência do concreto na emissão total
Concreto Referência	2,309	8,554	26,99%
Concreto 20% CBCA	2,043	8,289	24,65%
Concreto 40% CBCA	1,777	8,023	22,15%

Fonte: Autor (2013)

Percebe-se que, conforme esperado, com o aumento do teor de CBCA no concreto, a influência da emissão de CO<sub>2</sub> deste material no resto da obra diminui. A presença de concreto estrutural nessa construção é responsável por quase 30% da emissão total de CO<sub>2</sub>. Esse número poderia ser ainda maior se o sistema construtivo da obra fosse concreto armado moldado *in loco* ao invés de alvenaria estrutural.

A redução percentual de emissão de CO<sub>2</sub> para o caso em questão ao substituir parcialmente o cimento pela CBCA é melhor analisada através da tabela 31.

Tabela 31 - Redução na emissão de CO<sub>2</sub> proveniente do uso de CBCA em concretos

	Redução na emissão sem FP	Redução na emissão com FP
Concreto 20% CBCA	3,40%	3,15%
Concreto 40% CBCA	6,91%	6,41%

Fonte: Autor (2013)

Como pode ser analisado, a emissão gerada de CO<sub>2</sub> pela edificação pode cair até aproximadamente 7% ao trocar 40% do cimento pela CBCA. Se a substituição for no teor de 20%, a liberação de CO<sub>2</sub> reduziria até 3,4%. Se for levado em conta que uma construção de pequeno porte já há um ganho ecológico considerável como o que foi visto, esse benefício poderá ser ainda maior em obras mais amplas cujo consumo de concreto certamente é elevado.

Para um projeto da dimensão como o MCMV, a escolha de materiais em função das emissões de CO<sub>2</sub> associadas poderá resultar, no final, em um programa de construção de moradias bem sucedido em termos de preocupação ambiental tanto para os construtores quanto para os moradores.

## **6. CONSIDERAÇÕES FINAIS**

### **6.1. Conclusões**

Atualmente há uma grande necessidade de se otimizar o consumo dos recursos naturais, pois o volume de resíduos industriais vem se tornando uma ameaça ao equilíbrio ambiental. A indústria da construção civil é uma das maiores responsáveis pela poluição do planeta, haja visto o elevado índice de CO<sub>2</sub> lançado na atmosfera durante a produção do cimento *Portland*, além dos resíduos processados diariamente em várias partes do mundo.

Desta maneira, procurou-se estudar a viabilidade do uso da cinza do bagaço de cana-de-açúcar em substituição parcial do cimento *Portland* na produção de concretos, visando a obtenção de um produto que cause um menor impacto ambiental para a sociedade.

A partir dos resultados e discussões realizadas, foi possível concatenar conclusões a respeito do uso dessa cinza como adição mineral suplementar. A presença da CBCA melhorou as propriedades do concreto no estado fresco, com aumento dos valores do abatimento do tronco de cone, conferindo plasticidade e trabalhabilidade adequadas.

Com relação às propriedades mecânicas, o emprego da CBCA reduziu tanto a resistência à compressão quanto o módulo de elasticidade em comparação com o concreto convencional usado como referência para o trabalho. A baixa atividade pozolânica da cinza, bem como o pouco tempo de queima e moagem deste material pode ter contribuído para tais reduções. Vale frisar que era objetivo da pesquisa a utilização de uma cinza pouco beneficiada que não acarretasse maior dano ao meio ambiente.

Embora a resistência à compressão tenha sido inferior ao concreto de referência, nas duas misturas com teores de 20% e 40% de CBCA foram possíveis obter concretos com resistência estruturais de aproximadamente 25 MPa aplicáveis em construções.

Para provar o ganho ecológico provocado pelo uso de CBCA, foi estimado as emissões geradas pela construção de uma edificação residencial unifamiliar de baixa renda na cidade do Rio de Janeiro. Constatou-se que houve uma redução de 3,15% e 6,41% na liberação de CO<sub>2</sub> para a atmosfera relativo aos concretos com 20% e 40% de CBCA, respectivamente.

Dante dos objetivos traçados no início do trabalho e as conclusões acima, pode-se afirmar que a pesquisa desenvolvida traz contribuições no âmbito da construção sustentável, indicando que as cinzas produzidas com bagaço de cana-de-açúcar são viáveis ao emprego como aditivo mineral para concreto e, possivelmente, agregar benefícios ambientais a este importante material de engenharia.

## 6.2. Sugestões para trabalhos futuros

Por fim, algumas situações são sugeridas a fim de melhorar e aprimorar o estudo exploratório realizado até este momento. Primeiramente poderiam ser analisados outros teores de substituição do cimento Portland pela CBCA como, por exemplo, 10% e 30%.

Além disso, a observação de um maior tempo de pega para o concreto com 40% de CBCA, a ponto de não ser possível realizar os ensaios mecânicos na primeira idade, nos motiva a estudar mais detalhadamente sobre o tempo de pega e também sobre a fissuração que em nenhum momento foi abordado nesse trabalho.

A substituição do cimento pela CBCA em massa fica meio irreal, já que as massas específicas dos dois materiais são diferentes. Nesse caso, pode ocorrer de obter concretos com volumes diferenciados. Propõe-se, então, numa próxima pesquisa realizar essa substituição em volume. Outra proposta é a formação de concretos com a mesma consistência, alterando apenas a quantidade adicionada de superplastificante.

A realização de ensaios mecânicos em idades mais avançadas também contribuiria para a compreensão dos efeitos causados pelo uso da CBCA como aditivo mineral, a longo prazo, nas propriedades do concreto.

Também seria válido estimar a emissão de CO<sub>2</sub> em uma construção em que o sistema estrutural fosse de concreto armado *in loco* com a utilização de vigas e pilares, visto que o consumo de concreto estrutural nesse tipo de obra é superior ao de alvenaria estrutural avaliada neste trabalho. Sendo assim, é esperado que a redução na liberação de CO<sub>2</sub> ao se empregar concreto com CBCA seja ainda maior.

## REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICAS

ABCP, Associação Brasileira de Cimento Portland. *Emissão de CO<sub>2</sub> oriunda da fabricação de cimento*. Disponível em <[www.abcp.org.br/](http://www.abcp.org.br/)>. Acesso em 15 de setembro de 2012.

AGOPYAN, V.; SOUZA, U. E. L.; PALIARI, J. C.; ANDRADE, A. C., 1998, *Alternativas para a redução de desperdício de materiais nos canteiros de obras*. São Paulo: PCC/EPUSP, v. 1-5.

ANDRIOLI, F. R., 1999, “Relatório final – Panorama Brasileiro”. In: *Simpósio sobre reatividade álcali-agregado em estruturas de concreto*, Goiânia: Comitê Brasileiro de Barragens e Furnas centrais Elétricas S.A., pp. 12-59.

ANEEL, Agência Nacional de Energia Elétrica, 2005, *Atlas de energia elétrica do Brasil*, 2 ed. Brasília: ANEEL, 243 p.

ARAÚJO, R. D. E. A., 2011, Desenvolvimento de concretos de baixo impacto ambiental para a produção de elementos construtivos: contribuições à sustentabilidade das edificações. In: *53º Congresso Brasileiro do Concreto*: IBRACON, Florianópolis, SC, Brasil.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 1987, *Agregados - Determinação da composição granulométrica: NBR 7217*. Rio de Janeiro.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 1987, *Determinação da massa específica de agregados miúdos por meio do frasco Chapman: NBR 9776*. Rio de Janeiro.

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

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 1991, *Cimento Portland comum - Especificação: NBR 5732*. Rio de Janeiro.

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

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 1994, *Argamassa e concreto – Determinação da resistência à tração por compressão diametral de corpos-de-prova cilíndricos: NBR 7222*. Rio de Janeiro.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 1994, *Concreto – Ensaio de compressão de corpos-de-prova cilíndricos: NBR 5739*. Rio de Janeiro.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 1996, *Cimento Portland – Determinação da resistência à compressão – Método de ensaio: NBR 7215*. Rio de Janeiro.

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

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

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2003, *Concreto – Determinação dos módulos estáticos de elasticidade e de deformação e da curva tensão-deformação: NBR 8522*. Rio de Janeiro.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2007, *Projeto de estruturas de concreto - Procedimento: NBR 6118*. Rio de Janeiro.

ÂNGULO, S. C., 2005, *Caracterização de agregados de resíduos de construção e demolição reciclados e a influência de suas características no comportamento mecânico de concretos*. Tese de D.Sc., Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, SP, Brasil.

BARROSO, T. R., 2011, “Concreto de alto desempenho com cinzas do bagaço de cana-de-açúcar”. Dissertação de Mestrado, UENF, Campos dos Goytacazes - Rio de Janeiro, Brasil.

BATTAGIN, A.F, 1987. *Características das escórias e pozolanas adicionadas aos cimentos Portland brasileiros*. Associação Brasileira de Cimento Portland, 55p.

BOCCHI, M. L. M., 2012, *Aplicação do bagaço da cana-de-açúcar aplicada na atualidade*. Boletim Técnico, FATEC, Jaboticabal, SP, Brasil.

CAIXA Econômica Federal, 2006. *Cadernos Caixa: Projeto padrão Casas Populares*. Vitória, ES, Brasil.

CAIXA Econômica Federal. *Programa Minha Casa Minha Vida*. Disponível em: <<http://www1.caixa.gov.br/>>. Acesso em 22 de novembro de 2012.

CESNIK, R., MIOCQUE, J., 2004, *Melhoramento da cana-de-açúcar*, 1 ed. Brasília: EMBRAPA Informação Tecnológica, 307 p.

CINCOTTO, M. A., 1990, “Optimization of rice husk ash production”. In: *International symposium on vegetable plants and their fibers as building materials*, Salvador, Brazil, v. 2, pp. 334-342.

COELHO, S. T., 1999, *Mecanismos para implementação da co-geração de eletricidade a partir de biomassa. Um modelo para o Estado de São Paulo*. Tese de D.Sc., Universidade de São Paulo, São Paulo, SP, Brasil..

COLIMODIO, V. S., 2012, Análise numérica da utilização de reforço fibroso no controle da fissuração do concreto nas primeiras idades. *Relatório PIBIC/UFRJ*, Rio de Janeiro, RJ, Brasil.

CONAB, Companhia Nacional de Abastecimento. *Acompanhamento da safra brasileira: cana-de-açúcar - Safra 2012/2013*. Disponível em <[www.conab.gov.br/](http://www.conab.gov.br/)>. Acesso em 10 de outubro de 2012.

CORDEIRO, G. C., 2006, *Utilização de cinzas ultrafinas do bagaço de cana-de-açúcar e da casca de arroz como aditivos minerais em Concreto*. Tese de D.Sc., COPPE, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, RJ, Brasil.

COSTA, B. L. C, 2012, *Quantificação das emissões de CO<sub>2</sub> geradas na produção de materiais utilizados na construção civil no Brasil*. Dissertação de M.Sc., COPPE, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, RJ, Brasil.

FIRJAN, Federação das Indústrias do Estado do Rio de Janeiro. *Oportunidades de Trabalho na Construção Civil*. Disponível em <<http://www.firjan.org.br/>>. Acesso em 09 de setembro de 2012.

FOSSATI, M., 2008, *Metodologia para avaliação da sustentabilidade de projetos de edifícios: o caso de escritórios em Florianópolis*. Tese de D.Sc., Universidade Federal de Santa Catarina, Santa Catarina, SC, Brasil.

FREITAS, E. G. A., 1996, *Obtenção de tijolos de solo-cimento com adição de cinzas de bagaço de cana-de-açúcar para uso em construção civil*. Dissertação de M.Sc., Universidade Federal Fluminense, Niterói, RJ, Brasil.

FREITAS, E. G. A., RODRIGUES, E. H. V., ARAÚJO, R. C. L., FAY, L., 1998, Efeito da adição de cinzas de bagaço de cana na resistência à compressão de argamassa normal, In: *XXVII Congresso Brasileiro de Engenharia Agrícola*, v. 4, Poços de Caldas, Brasil, pp. 219-221.

GAYER, A. L. B., 2006, *Importância do Controle de Qualidade do Concreto no Estado Fresco*. Informativo técnico - Realmix , Ano 2 n.2, Universidade Federal de Goiás, Goiânia, GO, Brasil.

GIAMMUSSO, S. E. 1992, Manual do concreto, Ed. Pini, São Paulo, Brasil.

GRABOIS, T. M., 2012, *Desenvolvimento e caracterização de concretos leves autodensáveis reforçados com fibras de sisal e aço*. Tese de M.Sc., Universidade Federal do Rio de Janeiro/COPPE, Rio de Janeiro, RJ, Brasil.

Grandes obras construídas com o emprego do concreto, 2013. Disponível em <<http://imperioroma.blogspot.com.br>>. Acesso em 08 de janeiro de 2013.

HELENE, P. R. L; TERZIAN, P., 1993, *Manual de dosagem e controle do concreto*, São Paulo: Editora Pini.

HOSTEN, C., AVSAR, C., 1998, "Grindability of mixtures of cement clinker and trass", *Cement and Concrete Research*, v. 28, n. 11, pp. 1519-1524.

IBGE, Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. *Levantamento sistemático da produção agrícola*. Disponível em <<http://www.ibge.net/home/estatistica>>. Acesso em 09 de janeiro de 2013.

IPCC Intergovernmental Panel on Climate Change, Houghton J.T., Meira Filho L.G., Lim B., Tréanton K., Mamaty I., Bonduki Y., Griggs D.J. and Callander B.A. (Eds). *Revised 1996 IPCC Guidelines for National Greenhouse Inventories*. Paris: IPCC/OECD/IEA, 1997.

IPCC Intergovernmental Panel on Climate Change, National Greenhouse Gas Inventories Programme. *Climate Change 2007: The Physical Science Basis*. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Reino Unido e Nova York: Cambridge University Press, 2007a. 996 p.

IPCC Intergovernmental Panel on Climate Change. *Climate Change 2007: Mitigation of Climate Change*. Contribution of Working Group III to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Reino Unido e Nova York: Cambridge University Press, 2007b. 851 p.

LACERDA, C. S., 2005, *Estudo da influência da substituição de cimento Portland por metacaulim em concretos*. Boletim Técnico, Escola Politécnica da USP, São Paulo, SP, Brasil.

LARRARD, F., 1999, *Concrete Mixture Proportioning: A Scientific Approach, Modern Concrete Technology Series*, vol. 9, London, England.

LAWRENCE, P., CYR, M., RINGOT, E., 2003, "Mineral admixtures in mortars – Effect of inert materials on short-term hydration", *Cement and Concrete Research*, v. 33, n. 12, pp. 1939-1947.

LIMA, S. F., SALES, A., MORETTI, J. P., ALMEIDA, F. C. R., SANTOS, T. J., 2010, *Caracterização de concretos confeccionados com a cinza do bagaço da cana-de-*

açúcar. Congresso Internacional sobre Patologia e Reabilitação de Estruturas, Córdoba, Argentina.

LIMA, S. M., 2006, *Concretos de alto desempenho em ambientes com baixas temperaturas*. Dissertação de M.Sc., Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, SP, Brasil.

LORA, E. S., ARRIETA, F. P., CARPIO, R. C., 2001, “Eletricidade a partir do bagaço de cana”. In: Mello, M. G. (ed), *Biomassa – Energia dos trópicos em Minas Gerais*, 1 ed. Belo Horizonte: LabMídia, pp. 59-81.

MALHOTRA, V. M., 1999, “Making concrete ‘greener’ with fly ash”, *Concrete International*, v. 21, n. 5, pp. 61-66.

MALHOTRA, V. M., MEHTA, P. K., 1996, *Pozzolanic and cementitious materials*, 1 ed. Amsterdam: Gordon and Breach Publishers, 191 p.

MANHÃES, M. S., 1999, Adubação, correção do solo e uso de resíduos da agroindústria. In: *Tecnologia canavieira nas Regiões Norte Fluminense e Sul do Espírito Santo – Boletim Técnico* n. 12, UFRRJ, Campos dos Goytacazes, Rio de Janeiro, Brasil.

MARCONDES, F. C. S., 2007, *Sistemas logísticos reversos na indústria da construção civil - Estudo da cadeia produtiva de chapas de gesso acartonado*. Dissertação de Msc. Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, SP, Brasil.

MARTINS, C. H.; MACHADO, P. H. T., 2009, Uso da cinza do bagaço de cana-de-açúcar como agregado miúdo em argamassas. In: *7º Encontro Tecnológico da Engenharia Civil e Arquitetura*, UEM, Maringá, PR, Brasil.

MAPA – Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento. *Evolução da Produtividade da Cana-de-açúcar no Brasil*. Disponível em <<http://www.agricultura.gov.br>>. Acesso em: 08 de outubro de 2012.

MARTINS, E. A.; DAGNESE, F.; KLEINPAUL, J. F.; CARPES, F. P.; MOTA, C. B., 2007, Avaliação do posicionamento corporal no ciclismo competitivo e recreacional.

Revista Brasileira de Cineantropometria e Desempenho Humano, Florianópolis, v. 9, n. 2, p.183 -188.

MASSAZZA, F., 1998, "Pozzolana and pozzolanic cements". In: Hewlett, P. C. (ed), *Lea's chemistry of cement and concrete*, 4 ed. New York: J. Wiley, pp. 471-631.

MEHTA, P. K., MONTEIRO, P. J. M., 1994, *Concreto: estrutura, propriedades e materiais*, 1 ed. São Paulo: Editora Pini, 616 p.

MEHTA, P. K., MONTEIRO, P. J. M., 2008, *Concreto: microestrutura, propriedades e materiais*, 1 ed. São Paulo: Editora Pini, 616 p.

MESA VALENCIANO, M. C., 1999, *Incorporação de resíduos agroindustriais e seus efeitos sobre as características físico-mecânicas de tijolos de solo melhorado com cimento*. Dissertação de M.Sc., Universidade Estadual de Campinas, Campinas, SP, Brasil.

MORAES, M., 2012, *Adições Minerais ao Concreto*. Notas de aula, Pontifícia Universidade Católica de Goiás, Goiânia, GO, Brasil.

MOREIRA, J. R., GOLDEMBERG, J., 1999, "The alcohol program", *Energy Policy*, v. 27, n. 4, pp. 229-245.

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

NITA, C.; JOHN, V. M.. 2007, *Materiais pozolânicos: o metacaulim e a sílica ativa*. Boletim técnico da Escola Politécnica da USP, São Paulo, SP, Brasil.

NUNES, I. H. S., 2009, *Estudo das características físicas e químicas da cinza do bagaço de cana-de-açúcar*. Dissertação de M. Sc., PEU, Universidade Estadual de Maringá, PR, Brasil.

PAULA, M. O., 2006, *Potencial da cinza do bagaço de cana-de-açúcar como material de substituição parcial de cimento Portland*. Dissertação de M.Sc., Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG, Brasil.

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

Plantação de Cana-de-açúcar em Território Nacional, 2013. Disponível em <<http://meioambiente.culturamix.com/agricultura>>. Acesso em 09 de janeiro de 2013.

Revista Pesquisa FAPESP, 2011, *Cardápio energético*. Ed.Impressa, n.157.

SABIR, B. B., WILD, S., BAI, J., 2001, "Metakaolin and calcined clays as pozzolans for concrete: a review", *Cement and Concrete Research*, v. 23, n. 2, pp. 441-454.

SECCHI, M., ABE, M. A. P., VANDERELI, R. M., NUNES, I. H. S., SOUTO, J. M. F., 2009, *Estudo dos efeitos da cinza do bagaço da cana-de-açúcar nas propriedades mecânicas do concreto*. Encontro Nacional sobre Aproveitamento de Resíduos na Construção, Maringá, PR, Brasil.

SEPS, Sustainable Energy Project Support. *Baseline Calculation 2012: Environmental Performance Calculation Procedure*.

SILVA, V. L. M. M., GOMES, W. C., ALSINA, O. L. S., 2007, *Utilização do bagaço de cana-de-açúcar como biomassa adsorvente na adsorção de poluentes orgânicos*. Revista Eletrônica de Materiais e Processos, v.2, p.27-32.

SINGH, N. B., SINGH, V. D., RAI, S., 2000, "Hydration of bagasse ash-blended Portland cement", *Cement and Concrete Research*, v. 30, n. 9, pp. 1485-1488.

SNIC, Sindicato Nacional da Indústria do Cimento. *Produção de Cimento Portland no Mundo*. Disponível em <<http://www.snic.org.br/>>. Acesso em 10 de setembro de 2012.

SOUTO, J. M. F., 2010, *Avaliação do desempenho da cinza do bagaço de cana-de-açúcar na produção de concretos*. Dissertação de M.Sc., UEM, Maringá, PR, Brasil.

SOUZA G. N.; FORMAGINI, S.; CUSTÓDIO, F. O.; SILVEIRA, M. M., 2007, Desenvolvimento de argamassas com substituição parcial do cimento Portland por cinzas residuais do bagaço de cana-de-açúcar. In: *49º Congresso Brasileiro do Concreto*: IBRACON, São Paulo, SP, Brasil.

SOUZA, U.E.L.; PALIARI, J.C.; ANDRADE, A.C.; AGOPYAN, V., 1998, *Os valores das perdas de materiais nos canteiros de obras do Brasil*. In: Congresso Latino- Americano Tecnologia e Gestão na Produção de Edifícios: Soluções para o Terceiro Milênio. São Paulo: PCC-USP, v.1, p.355-361.

STRUBLE, L., GODFREY, J., 2004, "How sustainable is concrete?", In: *International Workshop on Sustainable Development and Technology*, part II, Beijing, China, pp. 201-211.

TOLEDO FILHO, R. D., AMERICANO, B. B., FAIRBAIRN, E. M. R., ROLIM, J. S., FILHO, J. F., 2001, "Potential of crushed waste calcined-clay brick as a partial replacement for Portland cement". In: *Third CANMET/ACI International Symposium on Sustainable Development of Cement and Concret*, San Francisco, USA, pp. 147-160.

UNICA. Setor Sucroenergético - Mapa da Produção. Disponível em <<http://www.unica.com.br>>. Acesso em 08 de Outubro de 2012.

Usina Sucroalcooleira Coagro em Campos dos Goytacazes, 2013. Disponível em <<http://www.coagro.coop.br/>>. Acesso em 05 de janeiro de 2013.

VELASCO, R. V., 2008, Concretos auto-adensáveis reforçados com elevadas frações volumétricas de fibras de aço: propriedades reológicas, físicas, mecânicas e térmicas. Tese de D.Sc., Universidade Federal do Rio de Janeiro/COPPE, Rio de Janeiro, RJ, Brasil.

WINSLOW, D. N.; COHEN, M. D., 1994, *Percolation and pore structura in mortars and concrete, Cement and Concrete Research*, v.24, pp25-37.

ZAMPIERI, V. A., 1993, *Mineralogia e mecanismos de ativação e reação das pozolanas de argilas calcinadas*. Dissertação de M.Sc., Universidade de São Paulo, São Paulo, SP, Brasil.

## ANEXO 1

---

### Fator de emissão de CO<sub>2</sub>, por material

Identificação	Unidade	Valor
Aço	tCO <sub>2</sub> /t produto	1,845
Agregados graúdos	tCO <sub>2</sub> /t produto	0,086
Agregados miúdos	tCO <sub>2</sub> /t produto	0,086
Alumínio (perfil)	tCO <sub>2</sub> /t produto	4,441
Argamassa 01	tCO <sub>2</sub> /t produto	0,197
Argamassa 02	tCO <sub>2</sub> /t produto	0,162
Argamassa 03	tCO <sub>2</sub> /t produto	0,142
Argamassa 04	tCO <sub>2</sub> /t produto	0,190
Argamassa 05	tCO <sub>2</sub> /t produto	0,159
Argamassa 06	tCO <sub>2</sub> /t produto	0,139
Argamassa 07	tCO <sub>2</sub> /t produto	0,186
Argamassa 08	tCO <sub>2</sub> /t produto	0,155
Argamassa 09	tCO <sub>2</sub> /t produto	0,137
Cal hidratada	tCO <sub>2</sub> /t produto	0,911
Cal virgem	tCO <sub>2</sub> /t produto	1,184
Cerâmica (revestimento)	tCO <sub>2</sub> /t produto	0,187
Cerâmica (telhas e tijolos)	tCO <sub>2</sub> /t produto	0,111
Cimento	tCO <sub>2</sub> /t produto	0,652
Concreto (bloco)	tCO <sub>2</sub> /t produto	0,184
Concreto (piso intortrevado)	tCO <sub>2</sub> /t produto	0,270
Concreto (tubo)	tCO <sub>2</sub> /t produto	0,224
Concreto (15MPa com Cimento CPII-F32)	tCO <sub>2</sub> /m <sup>3</sup> produto	0,328
Concreto (20MPa com Cimento CPII-F32)	tCO <sub>2</sub> /m <sup>3</sup> produto	0,351
Concreto (25MPa com Cimento CPII-F32)	tCO <sub>2</sub> /m <sup>3</sup> produto	0,359
Concreto (30MPa com Cimento CPII-F32)	tCO <sub>2</sub> /m <sup>3</sup> produto	0,387
Concreto (35MPa com Cimento CPII-F32)	tCO <sub>2</sub> /m <sup>3</sup> produto	0,404
Concreto (40MPa com Cimento CPII-F32)	tCO <sub>2</sub> /m <sup>3</sup> produto	0,424
Concreto (45MPa com Cimento CPII-F32)	tCO <sub>2</sub> /m <sup>3</sup> produto	0,451
Concreto (50MPa com Cimento CPII-F32)	tCO <sub>2</sub> /m <sup>3</sup> produto	0,480
Gesso	tCO <sub>2</sub> /m <sup>3</sup> produto	0,639
Gesso (placas)	tCO <sub>2</sub> /m <sup>3</sup> produto	0,766

<b>Identificação</b>	<b>Unidade</b>	<b>Valor</b>
Madeira na IMPM (para eucalipto)	tCO <sub>2</sub> /m <sup>3</sup> produto	0,409
Madeira na IMPM (para madeira amazônica)	tCO <sub>2</sub> /m <sup>3</sup> produto	0,496
Madeira na IMPM (para Pinus)	tCO <sub>2</sub> /m <sup>3</sup> produto	0,405
Madeira na IPM (para aglomerado e chapa de fibra)	tCO <sub>2</sub> /m <sup>3</sup> produto	0,308
Madeira na IPM (para HDF, MDF, MDP, OSB)	tCO <sub>2</sub> /m <sup>3</sup> produto	0,331
Plástico PVC	tCO <sub>2</sub> /t produto	0,615
Vidro	tCO <sub>2</sub> /t produto	0,844
Concreto 20% CBCA	tCO <sub>2</sub> /m <sup>3</sup> produto	0,358
Concreto 40% CBCA	tCO <sub>2</sub> /m <sup>3</sup> produto	0,312
Concreto Referência	tCO <sub>2</sub> /m <sup>3</sup> produto	0,405

Fonte: Autor (2013), adaptado de Costa (2012)

## ANEXO 2

---

### Fator de emissão de eletricidade para diferentes países entre 2007 e 2009 (tCO<sub>2</sub>/MWh)

Region/Country	tCO <sub>2</sub> /MWh	Region/Country	tCO <sub>2</sub> /MWh	Region/Country	tCO <sub>2</sub> /MWh	Region/Country	tCO <sub>2</sub> /MWh
<b>OECD Americas</b>	0.485	Armenia	0.145	Singapore	0.523	Marocco	0.690
USA (average)	0.531	Azerbaijan	0.462	Sri Lanka	0.425	Mozambique	0.000
Canada	0.184	Belarus	0.300	Thailand	0.530	Namibiae	0.253
Mexico	0.455	Bosnia-Herzegovina	0.908	Vietnam	0.409	Nigeria	0.396
Chile	0.398	Bulgaria	0.492	Other Asia	0.274	Senegal	0.594
<b>OECD Europe</b>	0.341	Croatie	0.337	<b>Middle East</b>	0.687	South Africa	0.900
Austria	0.183	Estonia	0.735	Bahrain	0.718	Sudan	0.470
Belgium	0.239	FYR of Macedonia	0.753	Cyprus	0.755	Togo	0.271
Czech Republic	0.534	Georgia	0.127	Iraq	0.731	Tunisia	0.547
Denmark	0.311	Gibraltar	0.756	Islamic Rep. Of Iran	0.609	United Rep. Of Tanzania	0.257
Finland	0.207	Kazakhstan	0.485	Israel	0.721	Zambia	0.003
France	0.089	Kyrgyzstan	0.087	Jordan	0.586	Zimbabwe	0.619
Germany	0.447	Latvia	0.160	Kuwait	0.810	Other Africa	0.489
Greece	0.739	Lithuania	0.116	Lebanon	0.698	<b>America</b>	0.178
Hungary	0.326	Malta	0.904	Oman	0.859	Argentina	0.358
Iceland	0.001	Republic of Moldova	0.513	Qatar	0.496	Bolivia	0.368
Ireland	0.482	Romania	0.436	Saudi Arabia	0.740	Brazil	0.075
Italy	0.416	Russia	0.322	Syria	0.649	Colombia	0.136
Luxembourg	0.382	Serbia	0.662	United Arab Emirates	0.694	Costa Rica	0.058
Netherlands	0.389	Slovenia	0.337	Yemen	0.649	Cuba	0.735
Norway	0.010	Tajikistan	0.031	<b>Africa</b>	0.641	Dominican Republic	0.633
Poland	0.652	Turkmenistan	0.810	Algeria	0.590	Ecuador	0.301
Portugal	0.379	Ukraine	0.373	Angola	0.220	El Salvador	0.304
Slovak Republic	0.223	Uzbekistan	0.462	Benine	0.695	Guatemala	0.354
Spain	0.337	Bangladesh	0.575	Botswanae	1.916	Haiti	0.513
Sweden	0.041	Brunei Darussalam	0.738	Cameroon	0.228	Honduras	0.391
Switzerland	0.040	China (incl. Hong Kong)	0.765	Congoe	0.139	Jamaica	0.478
Turkey	0.484	Chinese Taipei	0.647	Côte d'Ivoire	0.428	Netherlands Antilles	0.707
United Kingdom	0.480	DPR of Korea	0.483	DR of Congo	0.003	Nicaragua	0.506
<b>OECD Asia</b>	0.503	India	0.950	Egypt	0.459	Panama	0.297
Australia	0.862	Indonesia	0.757	Eritrea	0.665	Paraguay	0.000
Japan	0.435	Malaysia	0.638	Ethiopia	0.094	Peru	0.225
Korea	0.471	Myanmar	0.249	Gabon	0.366	Trinidad and Tobago	0.725
New Zealand	0.191	Nepal	0.004	Ghana	0.254	Uruguay	0.221
<b>Non-OECD</b>	0.503	Pakistan	0.447	Kenya	0.321	Venezuela	0.203
Albania	0.023	Philippines	0.471	Libya	0.868	Other Latin America	0.242

Fonte: Sustainable Energy Project Support (SEPS)

## ANEXO 3

---

**Estimativa de emissão de CO<sub>2</sub> dos materiais de construção presentes na edificação residencial unifamiliar para os diferentes concretos desenvolvidos na pesquisa**

Material	Unid	Quant.	Emissões sem FP Concreto Referência (tCO <sub>2</sub> )	Emissões com FP Concreto Referência (tCO <sub>2</sub> )	Emissões sem FP Concreto 20% CBCA (tCO <sub>2</sub> )	Emissões com FP Concreto 20% CBCA (tCO <sub>2</sub> )	Emissões sem FP Concreto 40% CBCA (tCO <sub>2</sub> )	Emissões com FP Concreto 40% CBCA (tCO <sub>2</sub> )
Fundações (viga baldrame)								
Blocos de concreto tipo calha 14x39x39cm (1 <sup>a</sup> fiada)	t	0,94	0,17	0,20	0,17	0,20	0,17	0,20
Blocos de concreto 14x39x39cm (2 <sup>a</sup> fiada)	t	0,94	0,17	0,20	0,17	0,20	0,17	0,20
Argamassa para os blocos da 2 <sup>a</sup> fiada (Argamassa 03)	t	0,18	0,03	0,06	0,03	0,06	0,03	0,06
Concreto estrutural para preenchimento das calhas	m <sup>3</sup>	0,64	0,26	0,27	0,23	0,24	0,20	0,21
Armação com 2 barras de ferro corridos diâmetro 8mm na 1 <sup>a</sup> fiada	t	0,03	0,06	0,06	0,06	0,06	0,06	0,06
Estrutura								
Concreto estrutural para vigotas de laje pré-moldada para forro, vãos até 3,50m e espessura igual a 8,0cm	m <sup>3</sup>	0,65	0,26	0,28	0,23	0,25	0,20	0,21
Capa de concreto estrutural 2cm	m <sup>3</sup>	0,84	0,34	0,36	0,30	0,32	0,26	0,28
Lajotas para laje	t	0,87	0,10	0,11	0,10	0,11	0,10	0,11
Armadura para lajes e vigotas	t	0,11	0,20	0,22	0,20	0,22	0,20	0,22

Material	Unid	Quant.	Emissões sem FP Concreto Referência (tCO <sub>2</sub> )	Emissões com FP Concreto Referência (tCO <sub>2</sub> )	Emissões sem FP Concreto 20% CBCA (tCO <sub>2</sub> )	Emissões com FP Concreto 20% CBCA (tCO <sub>2</sub> )	Emissões sem FP Concreto 40% CBCA (tCO <sub>2</sub> )	Emissões com FP Concreto 40% CBCA (tCO <sub>2</sub> )
Blocos de concreto tipo calha 9x19x19cm para viga de travamento	t	0,77	0,14	0,17	0,14	0,17	0,14	0,17
Concreto estrutural para enchimento das calhas	m <sup>3</sup>	0,32	0,13	0,14	0,11	0,12	0,10	0,11
Armação com 2 barras de ferro corridos diâmetro 5mm	t	0,012	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02
Paredes e painéis								
Alvenaria 1/2 vez de blocos de concreto 9x19x39cm	t	12,44	2,29	2,68	2,29	2,68	2,29	2,68
Argamassa de cimento, cal e areia traço 1:1:8 para assentamento da alvenaria (Argamassa 03)	t	1,33	0,19	0,41	0,19	0,41	0,19	0,41
Blocos de concreto tipo calha 9x19x19cm (para vergas e contra-vergas)	t	0,28	0,05	0,06	0,05	0,06	0,05	0,06
Concreto estrutural para enchimento das calhas	m <sup>3</sup>	0,12	0,05	0,05	0,04	0,05	0,04	0,04
Armação com 2 barras de ferro corridos diâmetro 5mm	t	0,004	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01
Cobertura								
Cobertura com telhas cerâmicas tipo plan	t	2,60	0,29	0,34	0,29	0,34	0,29	0,34
Madeiramento telhado (apoio em paredes, sem tesoura)	t	0,83	0,41	0,41	0,41	0,41	0,41	0,41
Argamassa da última fiada com cimento, cal e areia 1:2:9 (Argamassa 05)	t	0,04	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01
Esquadrias								
Porta de madeira almofadada 0,80x2,10m, esp. 3,5cm para pintura, incluindo marco tipo aduela e alizar 4,0x1,5cm	m <sup>3</sup>	0,059	0,029	0,029	0,029	0,029	0,029	0,029

Material	Unid	Quant.	Emissões sem FP Concreto Referência (tCO <sub>2</sub> )	Emissões com FP Concreto Referência (tCO <sub>2</sub> )	Emissões sem FP Concreto 20% CBCA (tCO <sub>2</sub> )	Emissões com FP Concreto 20% CBCA (tCO <sub>2</sub> )	Emissões sem FP Concreto 40% CBCA (tCO <sub>2</sub> )	Emissões com FP Concreto 40% CBCA (tCO <sub>2</sub> )
Porta de madeira compensado liso 0,70x2,10m, esp. 3,5cm para pintura, incluindo marco tipo aduela e alizar 4,0x1,5cm	m <sup>3</sup>	0,051	0,025	0,025	0,025	0,025	0,025	0,025
Porta de madeira compensado liso 0,60x2,10m, esp. 3,5cm para pintura, incluindo marco tipo aduela e alizar 4,0x1,5cm	m <sup>3</sup>	0,022	0,011	0,011	0,011	0,011	0,011	0,011
Janela de abrir 2 folhas de madeira para pintura tipo veneziana/vidro, incluindo ferragens, 1,00x1,20m	m <sup>3</sup>	0,030	0,015	0,015	0,015	0,015	0,015	0,015
Báscula de madeira para pintura, para vidro, incluindo ferragens, 0,80x0,80m	m <sup>3</sup>	0,003	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001
Báscula de madeira para pintura, para vidro, incluindo ferragens, 0,60x0,60m	m <sup>3</sup>	0,002	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001
Instalações elétricas								
Eletroduto PVC flexível tipo corrugado diâm. 20mm	t	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001
Eletroduto PVC flexível tipo corrugado diâm. 25mm	t	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
Eletroduto PVC flexível tipo corrugado diâm. 32mm	t	0,003	0,002	0,002	0,002	0,002	0,002	0,002
Caixa eletroduto PVC 4" x 2"	t	0,001	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
Poste de concreto 5m de altura	t	0,630	0,141	0,141	0,141	0,141	0,141	0,141
Aterramento com haste de 95mm <sup>2</sup> e 2,00m	t	0,001	0,003	0,003	0,003	0,003	0,003	0,003
Instalações hidráulicas								
Vaso sanitário de louça branca linha popular	t	0,030	0,006	0,01	0,006	0,01	0,006	0,01
Lavatório pequeno de louça branca sem coluna	t	0,008	0,002	0,002	0,002	0,002	0,002	0,002
Tubo PVC soldável diâm. 20mm	t	0,004	0,002	0,003	0,002	0,003	0,002	0,003

Material	Unid	Quant.	Emissões sem FP Concreto Referência (tCO <sub>2</sub> )	Emissões com FP Concreto Referência (tCO <sub>2</sub> )	Emissões sem FP Concreto 20% CBCA (tCO <sub>2</sub> )	Emissões com FP Concreto 20% CBCA (tCO <sub>2</sub> )	Emissões sem FP Concreto 40% CBCA (tCO <sub>2</sub> )	Emissões com FP Concreto 40% CBCA (tCO <sub>2</sub> )
Tubo PVC soldável diâm. 25mm	t	0,002	0,001	0,002	0,001	0,002	0,001	0,002
Tê PVC soldável diâm. 25mm	t	0,0001	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
Joelho PVC soldável 90° diâm. 20mm	t	0,0001	0,0001	0,0001	0,0001	0,0001	0,0001	0,0001
Joelho PVC soldável 90° diâm. 25mm	t	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
Bucha de redução PVC soldável 25mm x 20mm	t	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
Reservatório com capacidade 500 L, incluindo tampa	t	0,011	0,007	0,007	0,007	0,007	0,007	0,007
Instalações sanitárias								
Tubo PVC simples ponta e bolsa para esgoto diâm. 100mm	t	0,009	0,005	0,007	0,005	0,007	0,005	0,007
Tubo PVC simples ponta e bolsa para esgoto diâm. 50mm	t	0,001	0,000	0,001	0,000	0,001	0,000	0,001
Tubo PVC simples ponta e bolsa para esgoto diâm. 40mm	t	0,003	0,002	0,002	0,002	0,002	0,002	0,002
Joelho PVC simples 90° para esgoto diâm. 100mm	t	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
Joelho PVC simples 90° para esgoto diâm. 40mm	t	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
Luva PVC simples para esgoto diâm. 40mm	t	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
Luva PVC simples para esgoto diâm. 100mm	t	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
Caixa de inspeção 60x60x50cm em concreto pré-moldade esp. 5cm, incluindo fundo, tampa 70x70x5cm de concreto armado	m <sup>3</sup>	0,11	0,06	0,07	0,06	0,07	0,06	0,07
Armadura para tampa de concreto armado da caixa de inspeção diâm. 5,0mm	t	0,001	0,002	0,002	0,002	0,002	0,002	0,002

Material	Unid	Quant.	Emissões sem FP Concreto Referência (tCO <sub>2</sub> )	Emissões com FP Concreto Referência (tCO <sub>2</sub> )	Emissões sem FP Concreto 20% CBCA (tCO <sub>2</sub> )	Emissões com FP Concreto 20% CBCA (tCO <sub>2</sub> )	Emissões sem FP Concreto 40% CBCA (tCO <sub>2</sub> )	Emissões com FP Concreto 40% CBCA (tCO <sub>2</sub> )
Argamassa de cimento e areia 1:4 para o fundo da caixa de inspeção	t	0,05	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01
Caixa de gordura 60x60x50cm em concreto pré-moldade esp. 5cm, incluindo fundo, tampa 70x70x5cm de concreto armado	m <sup>3</sup>	0,13	0,07	0,07	0,07	0,07	0,07	0,07
Armadura para tampa de concreto armado da caixa de gordura diâm. 5,0mm	t	0,001	0,002	0,002	0,002	0,002	0,002	0,002
Caixa de passagem 60x60x50cm em concreto pré-moldade esp. 5cm, incluindo fundo, tampa 70x70x5cm de concreto armado	m <sup>3</sup>	0,13	0,07	0,00	0,07	0,00	0,07	0,00
Ferro para tampa de concreto armado da caixa de passagem diâm. 5,0mm	t	0,001	0,002	0,002	0,002	0,002	0,002	0,002
Fossa séptica diâmetro 1,2m e altura útil de 1,75m em anéis pré-moldados	t	0,77	0,17	0,19	0,17	0,19	0,17	0,19
Sumidouro diâmetro 1,2m e altura útil de 1,75m em anéis pré-moldados com furação	t	0,77	0,17	0,19	0,17	0,19	0,17	0,19
Lastro de brita para o fundo do sumidouro	t	0,10	0,01	0,02	0,01	0,02	0,01	0,02
Revestimentos								
Barra lisa de argamassa de cimento e areia, traço 1:4, espessura 2,0cm nas paredes do box (até 1,50m) e faixa de 0,50m nas áreas molhadas acima da pia, do tanque e do lavatório	t	0,20	0,04	0,05	0,04	0,05	0,04	0,05

Material	Unid	Quant.	Emissões sem FP Concreto Referência (tCO <sub>2</sub> )	Emissões com FP Concreto Referência (tCO <sub>2</sub> )	Emissões sem FP Concreto 20% CBCA (tCO <sub>2</sub> )	Emissões com FP Concreto 20% CBCA (tCO <sub>2</sub> )	Emissões sem FP Concreto 40% CBCA (tCO <sub>2</sub> )	Emissões com FP Concreto 40% CBCA (tCO <sub>2</sub> )
<b>Piso</b>								
Lastro de concreto estrutural sarrafeado para contrapiso, espessura de 6,0cm	m <sup>3</sup>	2,01	0,81	0,86	0,72	0,76	0,63	0,66
Calçada de proteção em concreto estrutural, espessura de 5,0cm e largura 60cm	m <sup>3</sup>	0,80	0,32	0,34	0,29	0,30	0,25	0,26
Piso cimentado liso espessura 2,5cm com argamassa de cimento e areia, traço 1:3	t	1,69	0,33	0,40	0,33	0,40	0,33	0,40
<b>Vidros</b>								
Vidro liso incolor espessura 3,0mm	t	0,016	0,013	0,013	0,013	0,013	0,013	0,013
Vidro fantasia incolor mini-bureau espessura 3,0mm	t	0,003	0,002	0,002	0,002	0,002	0,002	0,002

Fonte: Autor (2013), adaptado de Costa (2012) baseado em dados da Caixa (2006)