



**UNIVERSIDADE CATÓLICA DE PERNAMBUCO**  
**PRÓ-REITORIA ACADÊMICA**  
**PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO**  
**MESTRADO EM ENGENHARIA CIVIL**

**MARIA DA CONCEIÇÃO AGUIAR DO NASCIMENTO**

**UTILIZAÇÃO DA CINZA DO BAGAÇO DE CANA-DE-AÇÚCAR (CBC)**  
**EM SUBSTITUIÇÃO PARCIAL AO AGREGADO MIÚDO EM**  
**CONCRETO NÃO ESTRUTURAL.**

**RECIFE**

**2016**

**MARIA DA CONCEIÇÃO AGUIAR DO NASCIMENTO**

**UTILIZAÇÃO DA CINZA DO BAGAÇO DE CANA-DE-AÇÚCAR (CBC)  
EM SUBSTITUIÇÃO PARCIAL AO AGREGADO MIÚDO EM  
CONCRETO NÃO ESTRUTURAL.**

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO EM  
ENGENHARIA CIVIL, APRESENTADO A  
UNIVERSIDADE CATÓLICA DE PERNAMBUCO  
PARA A OBTENÇÃO DO TÍTULO DE MESTRE EM  
CIÊNCIAS EM ENGENHARIA CIVIL.

Orientadora: Prof<sup>ª</sup>. Dra. Eliana Barreto Monteiro

**RECIFE**

**2016**

UTILIZAÇÃO DA CINZA DO BAGAÇO DE CANA-DE-AÇÚCAR (CBC) EM  
SUBSTITUIÇÃO PARCIAL AO AGREGADO MIÚDO EM CONCRETO NÃO  
ESTRUTURAL.

MARIA DA CONCEIÇÃO AGUIAR DO NASCIMENTO

DISSERTAÇÃO SUBMETIDA AO CORPO  
DOCENTE DO CURSO DE PÓS-GRADUAÇÃO EM  
ENGENHARIA CIVIL DA UNIVERSIDADE  
CATÓLICA DE PERNAMBUCO, COMO PARTE  
DOS REQUISITOS NECESSÁRIOS À OBTENÇÃO  
DO GRAU DE MESTRE EM CIÊNCIAS EM  
ENGENHARIA CIVIL.

Aprovada por:

Prof.<sup>a</sup> Dra. Eliana Barreto Monteiro  
(Orientadora – Prof.<sup>a</sup> Dra. – UNICAP)

---

Prof. Romilde Almeida de Oliveira  
(Examinador interno – Prof.Dr. – UNICAP)

---

Prof. Dr. João Manoel de Freitas Mota  
(Examinador externo – Prof.Dr. – IFPE/Recife)

---

*RECIFE, PE - BRASIL*

*DEZEMBRO DE 2016*

## Dedicatória

Dedico este trabalho a toda minha família, que sempre me apoiou na minha vida profissional e pessoal.

## AGRADECIMENTOS

Durante o percurso do mestrado e elaboração desta dissertação, muitas pessoas tiveram importante participação, de forma direta ou indireta. Agradeço à orientação da professora Eliana Barreto Monteiro, que me incentivou e me deu suporte para realizar este trabalho e à professora Maria da Graça de Vasconcelos Xavier Ferreira, que sempre esteve disponível para ajudar e esclarecer dúvidas surgidas ao longo do processo. Aos técnicos do Laboratório da UNICAP e do IFPE, que deram o apoio necessário para a conclusão dos ensaios. A todos os professores que, durante o curso, me ajudaram a compreender melhor a engenharia civil.

Os amigos e familiares, que sentiram pela minha ausência em encontros festivos, enquanto me dedicava ao mestrado, agüentando por vezes minhas variações de humor e preocupação com o trabalho.

A minha mãe, Maria Lucília de Aguiar, por ter sempre incentivado e apoiado nas decisões que tomei na minha vida. Aos meus irmãos que me apoiaram e torceram por mim.

A meu esposo Roberto José da Silva, companheiro e amigo, por me apoiar e incentivar durante mais este percurso de nossa vida.

E finalmente ao meu filho, Luís Filipe de Aguiar Augusto Neto, por estar distante em alguns momentos, enquanto finalizava este trabalho, mas que é a razão de todo este esforço e minha vida.

A todos: muito obrigada.

## RESUMO

---

O Brasil é o maior produtor mundial no complexo sucroalcooleiro que vem se expandindo nos últimos tempos, impulsionado pelo advento da bioenergia, exercendo a liderança em todos os segmentos. O resíduo gerado ao final do processo de moagem do bagaço da cana-de-açúcar é utilizado para a geração de energia por meio da queima em caldeiras. Ao final da queima as cinzas residuais são lançadas no meio ambiente de forma inadequada, podendo causar problemas ambientais em decorrência da geração de resíduos como a cinza do bagaço de cana-de-açúcar. O interesse desta pesquisa justifica-se pela necessidade de se avaliar a possibilidade do emprego da cinza do bagaço da cana-de-açúcar (CBC) em estruturas de concreto, devido ao grande volume de geração e a preocupação com o meio ambiente. O objetivo desta pesquisa é avaliar o desempenho do concreto convencional confeccionado de resíduos de cana-de-açúcar proveniente de usinas. Os resultados foram apresentados com a substituição de 0%, 20% e 40% da areia natural por CBC, onde essa mistura pode contribuir para um composto mais durável que o concreto convencional. Conclui-se, também, que apesar do uso da CBC não ter diminuído significativamente o valor final do m<sup>3</sup> do concreto, o ganho em relação ao desempenho mecânico foi maior. Pode-se concluir que os corpos-de-prova produzidos obtiveram resistência mecânica suficiente para serem desmoldados, transportados e acondicionados antes do uso, da mesma forma que os de referência.

Palavras-chave: concreto, agregado miúdo, cinza do bagaço de cana-de-açúcar.

## ABSTRACT

---

Brazil is the world's largest non-sugar-alcohol complex that has been expanding in recent times, driven by the advent of bioenergy, exerting a leadership in all segments. The residue generated at the end of the sugarcane bagasse milling process is used for the generation of energy by burning in boilers. At the end of the burning as residual ash are released into the environment inadequately, and may cause environmental problems due to the generation of waste as a sugarcane bagasse ash. The interest of the research is to justify the demand through a job offer from the sugarcane bagasse ash (CBC) in concrete structures, due to the large volume of generation and the concern with the environment. The objective of this research is to evaluate the performance of the conventional concrete made of sugarcane residues proved from mills. The results were reported with a 0%, 20% and 40% substitution of natural sand by CBC, where this mixture may contribute to a compound more difficult than conventional concrete. It is also concluded that although the use of CBC has not significantly reduced the final value of  $m^3$  of concrete, the gain in relation to the mechanical performance was higher. It can be concluded that the specimens produced have obtained sufficient mechanical strength to be dismantled, transported and conditioned prior to use, in the same way as the referents.

Key-words: concrete, small aggregate, ash from sugarcane bagasse.

## SUMÁRIO

<b>RESUMO</b>	<b>V</b>
<b>ABSTRACT</b>	<b>VI</b>
<b>1. INTRODUÇÃO</b>	<b>13</b>
<b>1.1 JUSTIFICATIVA</b>	<b>14</b>
<b>1.2 OBJETIVOS</b>	<b>17</b>
1.2.1 Objetivo Geral	17
1.2.2 Objetivos Específicos	17
<b>1.3 ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO</b>	<b>18</b>
<b>2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA</b>	<b>19</b>
<b>2.1 Concreto</b>	<b>19</b>
2.1.1 Elementos constituintes do concreto	19
<b>2.2 A cana-de-açúcar</b>	<b>30</b>
2.2.1 A cana-de-açúcar no Brasil	34
2.2.2 A cana-de-açúcar em Pernambuco	37
2.2.3 Cinza do bagaço de cana-de-açúcar	40
<b>2.3 Estudo da durabilidade dos concretos</b>	<b>46</b>
<b>2.4 Desenvolvimento sustentável</b>	<b>47</b>
<b>3. PROGRAMA EXPERIMENTAL</b>	<b>52</b>
<b>3.1 Material utilizado</b>	<b>54</b>
3.1.1 Cimento Portland	54
3.1.2 Água	55
3.1.3 Brita	55
3.1.4 Areia	55
3.1.5 Aditivo superplastificante	56
3.1.6 Cinza do bagaço da cana-de-açúcar	56
<b>3.2 Método</b>	<b>57</b>
3.2.1 Coleta da CBC	57
3.2.2 Secagem	58
3.2.3 Moagem	58
3.2.4 Índice de finura	59
3.2.5 Ensaio de teor de umidade da cinza	59
3.2.6 Análise granulométrica	60
3.2.7 Difração de raios-X	61
3.2.8 Confeção do concreto	62
3.2.9 Resistência à compressão	66
3.2.10 Resistência à tração por compressão diametral	67
3.2.11 Módulo de Elasticidade Dinâmico	68
3.2.12 Absorção total	70
<b>4. RESULTADOS E DISCUSSÃO</b>	<b>71</b>
<b>4.1 Moagem e índice de finura da CBC</b>	<b>71</b>
<b>4.2 Teor de Umidade da CBC</b>	<b>72</b>

4.3	Distribuição granulométrica _____	72
4.4	Difração de raios-X _____	75
4.5	Resistência à compressão _____	76
4.6	Resistência à tração compressão diametral _____	79
4.7	Módulo de elasticidade _____	80
4.8	Absorção Total _____	82
5.	CONCLUSÕES _____	84
6.	SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS _____	85
	REFERÊNCIAS _____	86

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1-Fabricação do Cimento .....	21
Figura 2-Fases da hidratação de grãos de cimentos expressas pela variação da liberação de calor em função do tempo.....	22
Figura 3-Evolução média de resistência à compressão dos distintos tipos de cimento Portland.	24
Figura 4-Gráfico das faixas granulométricas das areias.....	25
Figura 5-Representação aproximada das faixas composicionais de aditivos minerais e cimento Portland no sistema SiO <sub>2</sub> -Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> -CaO.....	28
Figura 6-Colheita e transporte da cana-de-açúcar .....	32
Figura 7-Produção brasileira de cana-de-açúcar-safra 2014.....	34
Figura 8-Mapa da distribuição da cana-de-açúcar no Brasil.....	35
Figura 9- Cana-de-açúcar: corte, moagem, produção e queima do bagaço. ....	37
Figura 10- Localização das Microrregiões da Mata Meridional, Setentrional e de Vitória de Santo Antão na Mesorregião da Zona da Mata de Pernambuco.....	38
Figura 11-Bagaço de cana-de-açúcar (a) e diferentes cinzas residuais geradas após a queima do bagaço em caldeira: cinza escura com alto teor de carbono, característico de combustão incompleta(b), cinza com menor teor de carbono (c) e cinza gerada após a combustão completa (d). ....	44
Figura 12-Variação do índice de atividade pozolânica com cimento Portland (IAP) em função do tempo de moagem e superfície específica. ....	45
Figura 13--Principais causas de patologias do concreto .....	46
Figura 14-Relação água/cimento x Resistência à compressão. ....	47
Figura 15-Sustentabilidade.....	48
Figura 16-Divisão do desenvolvimento sustentável.....	48
Figura 17-Rota experimental desenvolvida neste trabalho.....	53
Figura 18-Cimento Portland utilizado:CP III-40 RS .....	54
Figura 19- Brita 19 mm, utilizada no experimento.....	55
Figura 20-Areia média, utilizada no experimento .....	56
Figura 21-CBC utilizada na pesquisa.....	56
Figura 22-Mapa do local de retirada da CBC.....	57
Figura 23-Estufas utilizadas para secagem .....	58
Figura 24-Moinho de bolas(a) e aspecto final da CBC após moagem(b).....	59
Figura 25- Amostra úmida (a) e Amostra seca(b) .....	60
Figura 26- Peneirador mecânico(a) e Peneiras(b) .....	60
Figura 27- Difratômetro de Raios-X.....	62

Figura 28-Separação de material (a), mistura (b,c e d), slump (e)(f), moldagem (g) e cura (h) .	65
Figura 29-Ensaio de Compressão dos CP's .....	66
Figura 30-cargas atuantes - Ensaio de resistência a tração por compressão diametral .....	67
Figura 31-CP recebendo cargas atuantes (a) e CP rompido(b).....	67
Figura 32-CP's rompidos com 0%(a), 20%(b) e 40%(c).....	68
Figura 33- Ensaio de ultrassom para determinar a velocidade de propagação da onda ultrassônica .....	69
Figura 34-CP na estufa(a) e separados por traço(b), pesagem(c) e imersão(d) .....	70
Figura 35- Curva granulométrica da CBC .....	73
Figura 36- Curva granulométrica da Areia .....	73
Figura 37- Curva granulométrica da brita.....	74
Figura 38-Difratograma da CBC da primeira amostra usada neste trabalho.....	75
Figura 39-Difratograma da segunda amostra da CBC usada neste trabalho .....	76
Figura 40-Resultado do ensaio de resistência a compressão. ....	78
Figura 41-Resultado do ensaio de resistência a tração por compressão diametral.....	80
Figura 42-Resultado do ensaio de Módulo de Elasticidade Dinâmico .....	81
Figura 43-Gráfico da absorção total aos 28 dias.....	82

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1-Composição típica da cana-de-açúcar .....	31
Tabela 2-Processo de produção industrial da cana-de-açúcar .....	33
Tabela 3-Área Plantada X Área colhida com cana-de-açúcar, 2013-2015.....	40
Tabela 4-Resíduos gerados pela produção da cana-de-açúcar. ....	41
Tabela 5-Composição química da cinza do bagaço de cana.....	43
Tabela 6-Classe de agressividade ambiental no concreto .....	47
Tabela 7-Produção de areia .....	50
Tabela 8-Composição dos cimentos comercializados no Brasil .....	54
Tabela 9-Characterização das propriedades dos concretos – Ensaio normalizados.....	64
Tabela 10-Composição final dos traços de concreto.....	64
Tabela 11- Valores do ensaio de ultrassom.....	70
Tabela 12-Teor de Umidade.....	72
Tabela 13-Granulometria do CBC .....	73
Tabela 14-Granulometria da areia.....	73
Tabela 15-Granulometria da brita.....	74
Tabela 16-Resistência a compressão do concreto aos 07 e aos 28 dias.....	77
Tabela 17-Resistência a tração por compressão diametral do concreto aos 28 dias .....	79
Tabela 18-Módulo de elasticidade dinâmico aos 28 dias .....	81
Tabela 19-Resultados do Ensaio de Absorção total aos 28 dias. ....	82

**LISTA DE SIGLAS**

- ABCP - Associação Brasileira de Cimento Portland
- ABNT- Associação Brasileira de normas técnicas
- ANEEL - Agência Nacional de Energia Elétrica
- ANEPAC- Associação Nacional das Entidades de Produtores de agregados na construção civil.
- CBC - Cinza do Bagaço de Cana-de-açúcar
- CONAB - Companhia Nacional de Abastecimento
- CO<sub>2</sub> - Gás Carbônico (dióxido de carbono)
- MPa - Mega Pascal
- MAPA - Ministério de Agricultura, Pecuária e Abastecimento
- SiO<sub>2</sub> - Dióxido de Silício
- UNICA- União da Indústria da Cana-de-açúcar

## 1. INTRODUÇÃO

---

Os avanços tecnológicos têm provocando uma contínua e crescente pressão sobre os recursos naturais do planeta, à medida que o desenvolvimento demanda uma quantidade razoável de matéria prima e gera um grande volume de resíduos.

Do ponto de vista do desenvolvimento sustentável esses resíduos devem ser minimizados ou reaproveitados na cadeia produtiva. Porém, a idéia de sustentabilidade ainda não está disseminada de forma abrangente, portanto, na área de Construção Civil, esforços vêm sendo feitos nos últimos anos para conscientizar todos os envolvidos no processo sobre a problemática que o segmento vem enfrentando com a geração de resíduos e a depredação das jazidas naturais.

Algumas pesquisas têm sido desenvolvidas na busca pela avaliação do uso da cinza do bagaço de cana-de-açúcar (CBC) em substituição parcial ao agregado miúdo para a confecção de pastas, argamassas e concretos.

O Brasil é o maior produtor de derivados da cana-de-açúcar no mundo e a produção tende a crescer continuamente devido a Política Nacional de Biocombustíveis, da qual um dos objetivos é aumentar a participação dos biocombustíveis na matriz energética nacional. Tais medidas levam a expectativa do aumento contínuo na geração de CBC, problema já enfrentado pelos administradores das usinas no que diz respeito à disposição final desse resíduo.

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

Este processo de cogeração libera dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) na atmosfera, a quantidade de emissões é significativamente menor se comparada com outras fontes de energia como o petróleo (FREITAS, et al 2005).

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

Diante disto, o desenvolvimento sustentável, é de suma importância a realização de estudos que visem o aproveitamento destes resíduos, dando a estes produtos valor comercial.

## **1.1 JUSTIFICATIVA**

A preocupação com o meio ambiente e a escassez de recursos naturais tem levado a busca por alternativas de crescimento mais sustentáveis por parte de todos os segmentos da sociedade.

A utilização da cinza do bagaço de cana-de-açúcar, atualmente, uma boa alternativa na redução do impacto causado pelo alto consumo de matéria-prima na produção do concreto.

### **1.1.1. Impactos científicos e tecnológicos**

Os resíduos de origem agroindustrial utilizados na produção de componentes para infraestrutura urbana tornaram possível a investigação de novas soluções tecnológicas para confecção de argamassas e concretos, principalmente em relação ao seu uso como substituto do agregado miúdo. É importante e imprescindível a produção de conhecimento científico pertinente a novos materiais para uso na construção civil, desde os aspectos macroestruturais até aos relacionados à durabilidade e a comparação com outros materiais convencionais.

### **1.1.2. Impactos ambientais**

A extração de areia nos rios provoca graves danos, como a turbidez da água, assoreamento em alguns casos, até mesmo o desvio do leito. A exploração de areia nas margens dos rios passa, em médio prazo, a provocar inundações, águas paradas e todas as suas conseqüências, como proliferação de insetos e doenças.

#### **a) Impactos Positivos.**

- ✓ Criação de empregos.
- ✓ Dinamização do setor comercial, proporcionando aquecimento da economia local.

- ✓ Implantação da rede viária.
- ✓ Aumento da receita dos governos estaduais e, principalmente, municipais.
- ✓ Aumento da oferta de areia, com repercussões positivas para a sociedade em geral, com a conseqüente melhoria da qualidade de vida.
- ✓ Melhoria nos aspectos paisagísticos do local, devido à recuperação e reabilitação da área utilizada.

b) Impactos Negativos

- ✓ Depreciação da qualidade do ar, devido ao lançamento de gases provenientes dos motores e de partículas sólidas, em virtude da utilização de maquinarias.
- ✓ Aumento da concentração de partículas em suspensão (turbidez) no curso d' água, devido ao atrito do material mineral com o corpo líquido, durante o processo de extração de areia.
- ✓ Contaminação do curso d'água causada pelos resíduos (óleos, graxas, lubrificantes) provenientes de maquinarias utilizadas nos diferentes tipos de operações.
- ✓ Alteração da calha original dos cursos d' água, em virtude do uso de equipamentos de extração de areia nos leitos dos rios.
- ✓ Alteração na paisagem - A simples operação dos equipamentos de extração e transporte, afeta de maneira significativa a paisagem local.
- ✓ Interferência sobre a fauna - A remoção de vegetação, a modificação na estrutura do solo, o aumento ou a introdução de ruídos, a circulação de caminhões, entre outros fatores, provocam a evasão ou alteração nos hábitos da fauna no entorno do local.
- ✓ Trepidação-Acarretada principalmente pela circulação de equipamento de desmonte, carregamento e transporte.
- ✓ Poluição sonora - Produzida pelo motor da draga de sucção, dos caminhões, do trator.

A deficiência na gestão e planejamento para a disposição dos resíduos tem se transformado em grave problema urbano e ambiental, o que leva a um gerenciamento oneroso e complexo por parte da administração municipal. A

escassez de áreas para deposição de resíduos causada pela ocupação e valorização de áreas urbanas, os altos custos sociais no gerenciamento dos resíduos, problemas de saneamento público e contaminação ambiental são alguns desses problemas.

Muitas vezes, resíduos não-urbanos ou potencialmente recicláveis ocupam espaço nos aterros, o que diminui sua capacidade em longo prazo. Em outros casos, resíduos agroindustriais são dispostos ao ar livre sem nenhum tratamento adequado. Uma prática para a construção com baixo impacto para o meio ambiente que fomenta o crescimento das cidades apresenta-se com uma tendência que vem se consolidando como importante prática de sustentabilidade.

Com a utilização da cinza do bagaço da cana-de-açúcar como agregado miúdo pretende-se diminuir o uso de areia retirada dos rios, e também reduzir o volume desses resíduos destinados inadequadamente. Dessa forma, a infraestrutura das cidades se expande, garantindo a manutenção dos serviços à população sem causar mais impactos ambientais com seu crescimento.

### 1.1.3. Impactos sociais e econômicos

Com a proposição de um novo valor agregado à cinza do bagaço da cana-de-açúcar (CBC) pode gerar novos postos de trabalho e a criar um novo nicho econômico para os subprodutos da indústria sucroalcooleira. Vale ressaltar que as medidas ambientais que estão sendo adotadas em conjunto com a política nacional de biocombustíveis (subsídios à produção de etanol) tende a aumentar a quantidade de resíduos provenientes da cana-de-açúcar, por isto, a presente proposta representa importante contribuição em termos sociais e econômicos.

Os impactos apresentados justificam a viabilidade da substituição da areia natural por cinzas do bagaço da cana-de-açúcar (CBC), como opção viável na produção de artefatos de infraestrutura urbana com menor custo em relação aos tradicionais.

## **1.2 OBJETIVOS**

### 1.2.1 Objetivo Geral

O objetivo deste trabalho é verificar a viabilidade técnica da utilização de resíduo de cinza do bagaço de cana-de-açúcar em substituição ao agregado miúdo.

### 1.2.2 Objetivos Específicos

Os objetivos específicos deste trabalho são:

- determinação do teor ideal dos resíduos a serem utilizados como agregados;
- avaliação da permeabilidade através de ensaios de absorção de água dos compósitos fabricados;
- avaliação das propriedades mecânicas (resistência à compressão axial e a tração por compressão diametral);

### **1.3 ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO**

Esta dissertação foi elaborada para proporcionar o entendimento do tema bem como a análise dos resultados obtidos, abrangendo 5 capítulos.

Capítulo 1 – Introdução: aborda o contexto no qual a dissertação está inserida, englobando os aspectos técnicos, além dos objetivos que direcionam o desenvolvimento do trabalho.

Capítulo 2 – Revisão bibliográfica: apresenta os temas mais relevantes para a pesquisa: Cimento Portland, aditivos, adições e a cinza do bagaço de cana-de-açúcar.

Capítulo 3 – Programa experimental: trata das etapas do programa experimental, detalhando a metodologia empregada para a caracterização dos materiais e para a realização dos ensaios.

Capítulo 4 – Resultados e Discussões: Pontua os resultados obtidos no programa experimental bem como as análises e a discussões pertinentes aos resultados apresentados.

Capítulo 5 – Conclusão e Sugestões para trabalhos futuros: relata as conclusões e comentários pertinentes aos resultados obtidos e apresenta sugestões de temas para a continuidade desta pesquisa.

## 2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

---

Neste capítulo são apresentados os tópicos relevantes do levantamento bibliográfico realizado. Inicialmente são alinhados os conceitos de concreto, cana-de-açúcar e desenvolvimento sustentável. Em um segundo momento, são abordados os materiais utilizados no experimento e posteriormente os tópicos sobre durabilidade e resistência.

### 2.1 Concreto

Concreto é um material formado pela mistura de cimento, água, agregado graúdo (brita ou cascalho) e agregado miúdo (areia). O concreto fresco tem consistência plástica, podendo ser moldado, na forma e dimensões desejadas, bastando lançar a massa fresca no interior de fôrmas de madeira ou outro material adequado.

O concreto endurecido tem elevada resistência à compressão, mas baixa resistência à tração.

#### 2.1.1 Elementos constituintes do concreto

Os concretos, de emprego usual nas estruturas, são constituídos de quatro materiais: cimento portland, água, agregado fino e agregado graúdo.

O cimento e a água formam a pasta, que enche a maior parte dos espaços vazios entre os agregados. Algum tempo depois de misturado o concreto, a pasta endurece, formando um material sólido.

Os agregados são considerados materiais inertes, enquanto a pasta (cimento + água) constitui o material ligante que junta as partículas dos agregados em uma massa sólida.

As propriedades ligantes da pasta são produzidas por reações químicas entre o cimento e a água. A quantidade de água necessária para a reação é pequena, porém se usa uma quantidade superior para obter trabalhabilidade, permitindo também a inclusão de maior quantidade de agregado.

Entretanto, a adição de água diminui a resistência da pasta, sendo necessário empregar uma proporção adequada entre as quantidades de água e cimento para se obter um concreto satisfatório.

Os agregados constituem cerca de 60% a 80% do concreto, o que tem sentido econômico, pois o agregado é mais barato que a pasta.

Como os agregados constituem uma porcentagem elevada do concreto, a sua escolha tem grande importância. Os agregados devem atender a três condições:

- a) Serem estáveis nas condições de exposição do concreto, não contendo materiais com efeitos prejudiciais;
- b) Apresentarem resistência à compressão e ao desgaste;
- c) Serem graduados, de modo a reduzir o volume da pasta, que deve encher os espaços entre os agregados.

#### 2.1.1.1 Cimento Portland

Cimento Portland é a denominação técnica utilizada mundialmente para o material conhecido como cimento. Trata-se de um pó fino, com propriedades aglomerantes, que endurece sob a ação da água. Depois de endurecido, mesmo em contato novamente com a água, o cimento Portland não se decompõe. A mistura com água e outros materiais de construção (pedra, areia e cal) possibilita a produção de concretos e argamassas utilizados na construção de casas, edifícios, pontes, barragens e estradas.

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

As características e propriedades desses produtos dependem da qualidade e proporções dos materiais que os compõem. Entre estes, o cimento é o mais ativo do ponto de vista químico, sendo responsável pela transformação da mistura no produto final desejado (uma laje, viga, revestimento, etc). Este aglomerante

hidráulico finamente moído, obtido pela mistura homogênea de clínquer (calcário e argila cozidos ou calcinados em fornos a altas temperaturas e resfriados bruscamente), sulfato de cálcio (gesso) e adições normalizadas, com o acréscimo de água, formam uma pasta homogênea, capaz de endurecer o insumo e conservar essa capacidade mesmo quando submersa.

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

A Figura 1 mostra o processo de fabricação do Cimento Portland.

Figura 1-Fabricação do Cimento



Fonte: Associação Brasileira de Cimento Portland – ABCP(2002)

Na queima das matérias-primas para a produção de clínquer ocorrem transformações mineralógicas que resultam nos componentes formadores do clínquer Portland: silicato tricálcico ou alita ( $C_3S$ ), silicato dicálcico ou belita ( $C_2S$ ), aluminato tricálcico ( $C_3A$ ) e ferro aluminato tetracálcico ( $C_4AF$ ) (KIHARA; CENTURIONE, 2005).

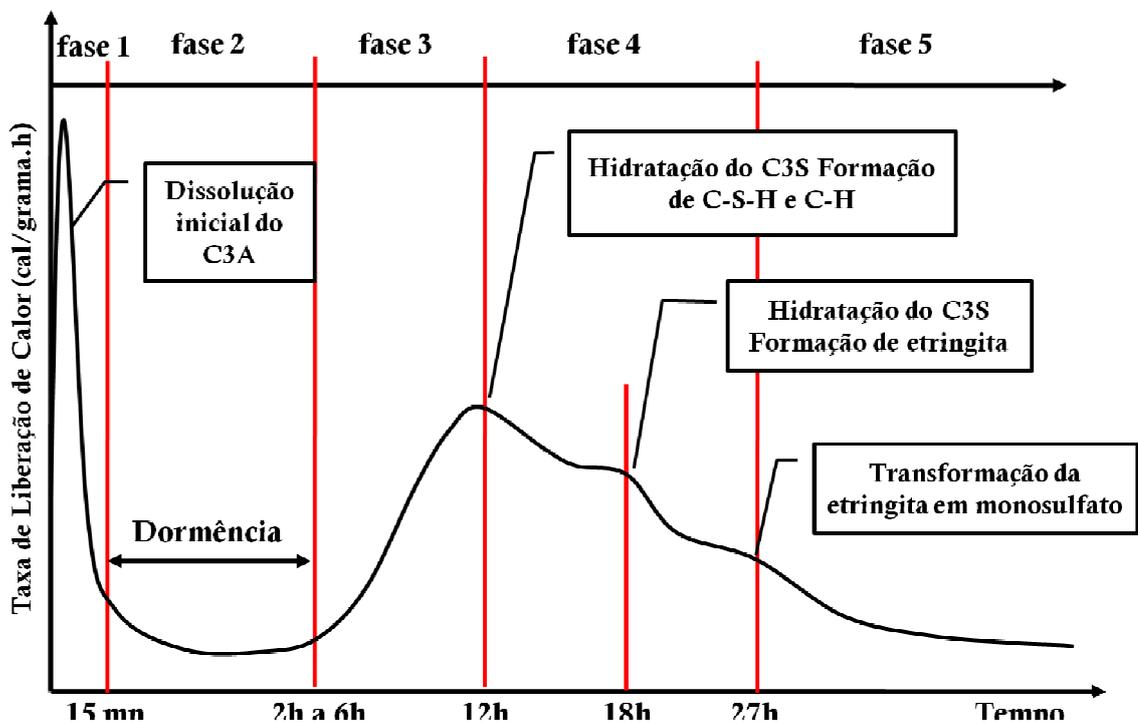
A moagem é uma das últimas etapas da fabricação do cimento, é um processo de fragmentação sob cargas mecânicas, além de está relacionado com a finura e com a

distribuição granulométrica do cimento. A finura define a velocidade da reação de hidratação do cimento, uma vez que está intimamente ligado à superfície específica das partículas.

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

Como as reações de hidratação são exotérmicas, é possível acompanhar as taxas de reação através da quantidade de calor liberado, como pode ser visto na Figura 2.

Figura 2-Fases da hidratação de grãos de cimentos expressas pela variação da liberação de calor em função do tempo



Fonte: THOMAZ; CARNEIRO, 2007

Podemos observar os seguintes pontos em cada fase:

- Fase 1 - é iniciada a dissolução do aluminato tricálcico ( $C_3A$ ), em presença de água, com a formação da etringita.
- Fase 2- inicia-se o período de dormência, no qual o prosseguimento da hidratação do cimento é prejudicado devido à formação de etringita na superfície dos grãos de cimento.

- Fase 3 - retomada da reação principalmente devido à hidratação do C<sub>3</sub>S, com a formação de silicatos de cálcio hidratados (C-S-H) e de hidróxido de cálcio (C-H).
- Fase 4 - a taxa de liberação de calor começa a cair em função da hidratação do C<sub>3</sub>A e do C<sub>3</sub>S, sendo formados os compostos C-S-H e etringita.
- Fase 5 - a hidratação passa a ser menor, com a diminuição da taxa de liberação de calor até um nível constante.

Atualmente, existem 7 tipos básicos de cimento Portland normalizados e disponíveis no mercado brasileiro:

- I. Cimento Portland Composto (CP II)
- II. Cimento Portland de Alto-Forno (CP III)
- III. Cimento Portland Pozolânico (CP IV)
- IV. Cimento Portland de Alta Resistência Inicial (CP V-ARI)
- V. Cimento Portland Resistente a Sulfatos (RS)
- VI. Cimento Portland de Baixo Calor de Hidratação (BC)
- VII. Cimento Portland Branco (CPB)

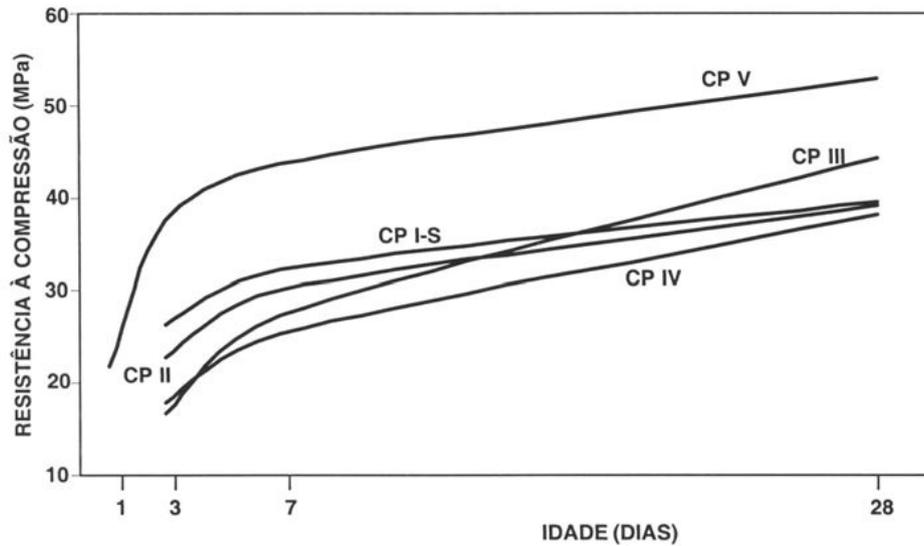
A esses tipos se somam subtipos, em função da natureza da adição e classes de resistência, que levam à existência de mais de duas dezenas de produtos normalizados no mercado. Os produtos ofertados pelos fabricantes são baseados na disponibilidade de matéria-prima e adições, bem como dos equipamentos de moagem e armazenamento de cada regional.

Variando-se a composição do cimento é possível obter diversos tipos, com diferentes características quanto ao tempo de pega, calor de hidratação, resistência mecânica, resistência a sulfatos, etc.

Alguns apresentam características adicionais que os qualificam para fins específicos, como o cimento Portland de alta resistência inicial (CP V), indicado para aplicações em que é fundamental a elevada resistência às primeiras idades.

Na Figura 3, pode-se observar a evolução da resistência à compressão de alguns tipos de Cimento Portland.

Figura 3-Evolução média de resistência à compressão dos distintos tipos de cimento Portland.



Fonte: ABCP, 2002

#### 2.1.1.2 Agregados

Os agregados constituem uma elevada percentagem do concreto, de modo que as suas características têm importância nas proporções empregadas e na economia do concreto. Os agregados em geral devem ser formados por partículas duras e resistentes, isentas de produtos deletérios, tais como: argila, mica, silte, sais, matéria orgânica e outros. A composição granulométrica dos agregados é determinada em ensaios padronizados de peneiração. As curvas granulométricas devem ficar dentro de certos limites, fixados nas especificações, de modo que os agregados misturados apresentem um bom entrosamento, com pequeno volume de espaço vazio entre suas partículas. Esse bom entrosamento resulta em economia de pasta de cimento, que é o material mais caro do concreto. Denomina-se percentagem acumulada em uma dada peneira a percentagem das partículas de agregado maiores que a abertura dessa peneira. A composição granulométrica é representada numa curva tendo como abscissa as aberturas das peneiras e como ordenadas as respectivas percentagens acumuladas.

##### 2.1.1.2.1 Agregados miúdos

As areias são agregados miúdos originados através de processos naturais, ou artificiais de desintegração de rochas, ou provenientes de processos industriais, é

chamada de areia natural se resultante de ação de agentes da natureza; de areia artificial, quando proveniente de processos industriais; de areia reciclada, quando proveniente de processos de reciclagem; e de areia britada, quando proveniente de cominuição mecânica de rocha, conforme normas específicas (NBR 9935, 2011).

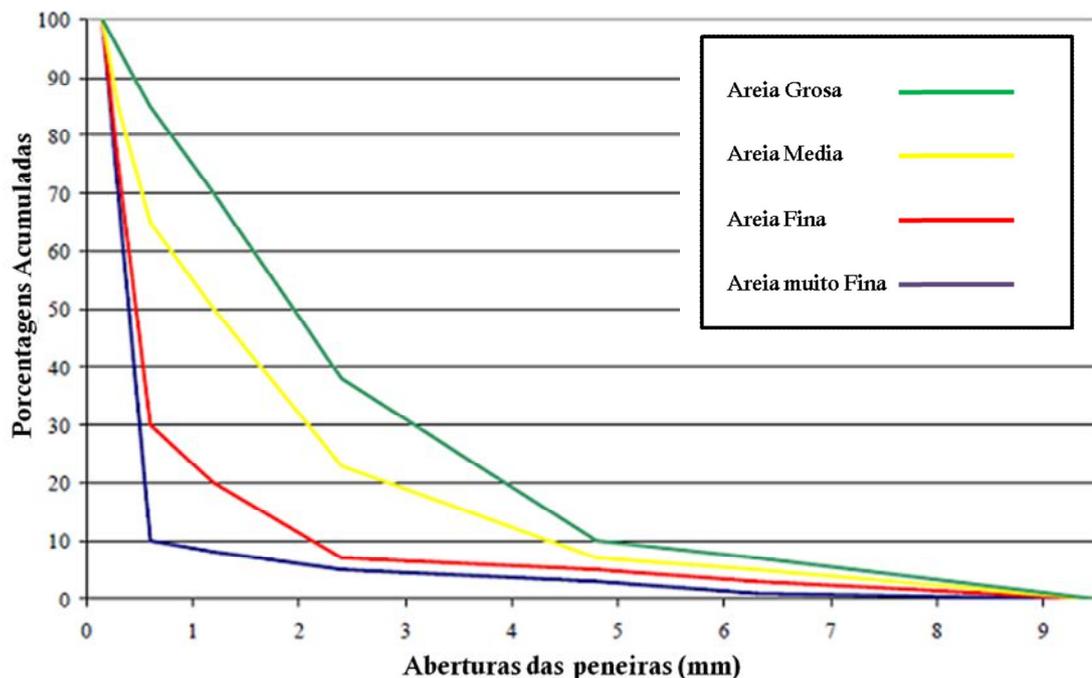
Os processos de fragmentação e transporte do sedimento podem estar relacionados a meio aquoso ou eólico, sendo as características físicas dos grãos, como tamanho, arredondamento e esfericidade relacionados ao meio no qual as partículas foram transportadas e a distância percorrida.

De acordo com a NBR 7211(2009), as areias são divididas conforme o valor do seu módulo de finura, que é a soma das porcentagens retidas acumuladas, nas peneiras da série normal, dividida por 100:

- Areia grossa – módulo de finura entre 3,35 e 4,05;
- Areia média – módulo de finura entre 2,40 e 3,35;
- Areia fina – módulo de finura entre 1,97 e 2,40;
- Areia muito fina – módulo de finura menor que 1,97.

A Figura 4, mostra a distribuição granulométrica das areias:

Figura 4-Gráfico das faixas granulométricas das areias.



Fonte: autor, 2016

#### 2.1.1.2.2 Agregado graúdo

A brita ou pedra britada é um bem mineral que pode ser constituído de vários tipos de materiais rochosos, disponíveis nos locais de extração e caracteriza-se como um material que, depois de sofrer desmonte por explosivos, britagem e classificação, pode ser usada *in natura*, ou misturada com outros insumos (cimento, asfalto, areia, etc.) e utilizada na construção civil (ANEPAC, 2015).

Segundo a NBR 9935 (2011) as britas são agregados graúdos, originados da cominuição mecânica da rocha.

Os agregados graúdos são classificados conforme os tamanhos das partículas componentes (diâmetros mínimos e máximos), a saber:

- a) Brita 0 → 4,8 a 9,5mm;
- b) Brita 1 → 9,5 a 19mm;
- c) Brita 2 → 19 a 25mm;
- d) Brita 3 → 25 a 50mm;
- e) Brita 4 → 50 a 76mm;
- f) Brita 5 → 76 a 100mm;

Os tamanhos mais utilizados em concreto são: brita 1 ou uma mistura de brita 1 e brita 2.

#### 2.1.1.3 Água

A água utilizada na confecção do concreto deve ser, de preferência, potável, não devendo conter resíduos industriais ou substâncias orgânicas. A experiência mostra que diversos sais minerais não prejudicam o concreto, quando dissolvidos em concentrações toleráveis.

#### 2.1.1.4 Aditivos

O aditivo redutor de água ou tensoativo provoca boa dispersão dos grãos de cimento, evitando a sua floculação, além aumentar a fluidez do concreto, sem adição de mais cimento ou água e elevar a resistência à compressão sem aumentar o teor de cimento ou reduzir a consistência da mistura (MEHTA; MONTEIRO, 1994).

Comparados aos aditivos plastificantes, os superplastificantes ou redutores de água de alta eficiência são capazes de reduzir três a quatro vezes a água e podem ser

incorporados em quantidades maiores sem causar exsudação excessiva e retardamento do tempo de pega (MEHTA; MONTEIRO, 1994).

Os aditivos incorporadores de ar são utilizados no concreto quando este estiver exposto a ciclos de congelamento e descongelamento, por isso sua aplicação é bastante comum em pavimentos de rodovias, pisos de estacionamentos e calçadas. Este tipo de aditivo promove melhoria da trabalhabilidade e da coesão do concreto embora reduza a sua resistência (EDMEADES; HEWLETT, 2007).

A importância dos aditivos retardadores de pega se deve ao fato de propiciar o lançamento e o acabamento adequados do concreto em condições de temperaturas elevadas e de controlar a pega de grandes unidades estruturais para manter o concreto trabalhável durante seu lançamento (MEHTA; MONTEIRO, 1994).

#### 2.1.1.5 Adições

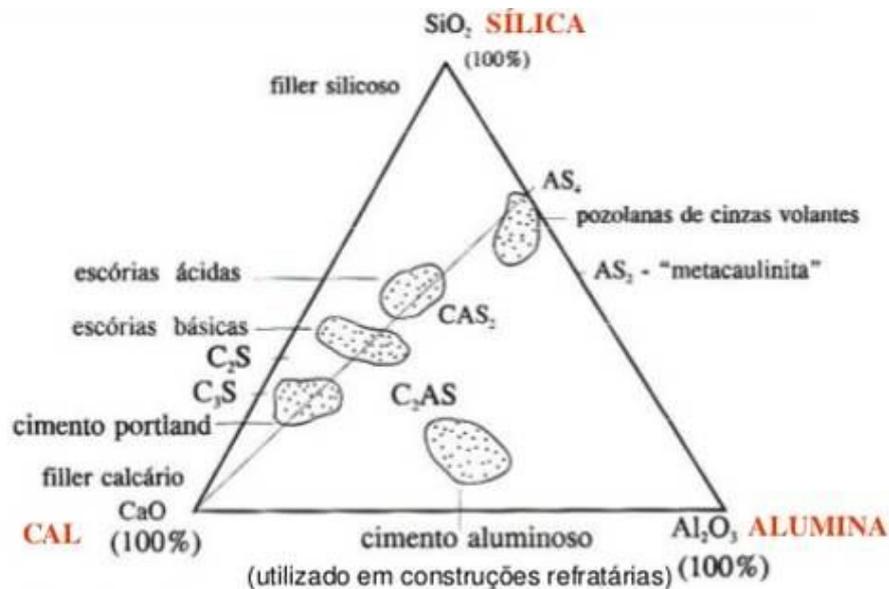
Conforme a NBR 11172 (1990), as adições são produtos de origem mineral adicionadas aos cimentos, argamassas e concretos com a finalidade de alterar suas características. A adição mineral interage química e fisicamente com os produtos da hidratação do clínquer ou do cimento Portland, modificando a microestrutura da pasta (SILVA, 2007) e as propriedades físicas e químicas do produto final endurecido (ACI, 1981).

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

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

A Figura 5 mostra a representação aproximada das faixas de composição de aditivos minerais e de cimento Portland no sistema  $\text{SiO}_2\text{-Al}_2\text{O}_3\text{-CaO}$ .

Figura 5-Representação aproximada das faixas composicionais de aditivos minerais e cimento Portland no sistema  $\text{SiO}_2\text{-Al}_2\text{O}_3\text{-CaO}$



Fonte: adaptado de CORDEIRO, 2006 e KIHARA; CENTURIONE, 2005

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

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

#### 2.1.1.5.1 Efeito físico

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

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

#### 2.1.1.5.2 Efeito químico

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

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

#### 2.1.1.5.3 Atividade Pozolânica

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

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

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

Para que um material seja classificado como material pozolânico, através da NBR 12653 (2015), estabelece algumas exigências físicas e químicas, tais como o valor mínimo de 70% para a soma dos teores de  $\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3$ , a perda ao fogo máxima de 6%. Além disso, a mesma norma estipula o índice de atividade pozolânica com cimento, aos 28 dias, mínimo de 75% e o valor mínimo de 6,0 MPa para a atividade pozolânica com cal. Contudo, Tashima (2006) critica o valor mínimo de 70% da soma  $\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3$  exigido pela NBR 12653 (2015), já que a reação pozolânica está diretamente relacionada com a presença de  $\text{SiO}_2$  e/ou  $\text{Al}_2\text{O}_3$  em estado amorfo e não propriamente com a porcentagem de óxidos presentes.

O teor de anidrido sulfúrico ( $\text{SO}_3$ ) deve ter valor máximo de 4% conforme os parâmetros da NBR 12653 (2015) para evitar-se a expansão pela formação de etringita já nas primeiras idades. A presença de sódio e potássio em teor elevado pode ser indesejável por favorecer o aparecimento de eflorescências ou a ocorrência de reação álcali-agregado (SILVA, 2007). O teor máximo de álcalis disponíveis, expresso em  $\text{Na}_2\text{O}$  equivalente ( $\text{Na}_2\text{O} + 0,64\text{K}_2\text{O}$ ) é 1,5 para ABNT pela NBR 12653 (2015).

## **2.2 A cana-de-açúcar**

As primeiras notícias sobre a existência da cana-de-açúcar encontram-se anotadas nas escrituras mitológicas dos hindus e nas Sagradas Escrituras. A produção de açúcar, denominada “sarkara”, existia na Índia desde 3000 a.C. Até o século XVIII foi considerada como remédio e mesmo como artigo de luxo. A cana-de-açúcar é uma planta nativa das regiões tropicais, cujo cultivo se estende, atualmente, aos dois hemisférios. A teoria mais aceita de sua origem considera que ela seja nativa das ilhas do Arquipélago da Polinésia, sendo *Saccharum robustum* uma espécie botânica que se originou no centro de expansão da Nova Guiné (CESNIK; MIOCQUE, 2004).

A composição química típica da cana-de-açúcar é apresentada Tabela 1

Tabela 1-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: CESNIK & MIOCQUE, 2004

Durante as navegações da Idade Média, as caravelas, antes de iniciarem suas viagens, levavam mudas de cana-de-açúcar junto as suas provisões, para serem plantadas em novas terras e servirem de suprimentos às novas expedições. Foi assim que ela foi introduzida nas Américas com a segunda expedição de Cristóvão Colombo, em 1493 e, no Brasil em 1502, por Martim Afonso de Souza, proveniente de mudas da Ilha da Madeira. Há registro na alfândega de Lisboa de entrada de açúcar brasileiro nos anos de 1520 e 1526 (CESNIK, 2008).

A cana-de-açúcar é uma gramínea que possui, quando amadurecida, um grande teor de açúcares, com cerca de um terço da matéria seca dos colmos. A cultura da cana é semiperene, ou seja, pode ser cortada e colhida sem a necessidade de replantio, por 5 a 7 safras (5 a 7 anos). Depois desse período, o plantio pode ser alternado com outro tipo de cultura no terreno (UNICA, 2009).

Introduzida no período colonial, a cana-de-açúcar se transformou em uma das principais culturas da economia brasileira. O Brasil, além de ser o maior produtor de cana é o primeiro do mundo na produção de etanol e conquista, cada vez mais, o mercado externo com o uso do biocombustível como alternativa energética.

A colheita da cana consiste em um processo dinâmico, que permite o fornecimento de matéria-prima à indústria e, envolve desde o planejamento de queima (se for o caso) e corte até a entrega da cana na indústria. A época de colheita da cana no Brasil varia de acordo com a região. Nas regiões Sudeste, Centro-Oeste e Sul a colheita inicia-se entre abril e maio prolongando-se até novembro, período em que a cana atinge a maturação plena. Na região Nordeste a colheita inicia-se de julho a agosto e prolonga-se até março do ano seguinte, em alguns casos.

O sistema de colheita pode ser de três formas:

- a) Manual, o corte e o carregamento são feitos de forma manual (Figura 6 a).
- b) Semimecanizado, o corte é feito manualmente e o carregamento por carregadoras mecânicas, em unidades de transporte.
- c) Mecanizado utilizando cortadoras de cana inteira com carregamento mecânico, ou colhedora de cana picada, que são as mais usuais (Figura 6 b).

Figura 6-Colheita e transporte da cana-de-açúcar



Fonte: Noções da cultura da cana-de-açúcar/João Paulo Nunes da Silva, Maria Regina Nunes da Silva. – Inhumas: IFG; Santa Maria: Universidade Federal de Santa Maria, 2012

Responsável por mais da metade do açúcar comercializado no mundo, o País deve alcançar taxa média de aumento da produção de 3,25%, até 2018/19, e colher 47,34 milhões de toneladas do produto, o que corresponde a um acréscimo de 14,6 milhões de toneladas em relação ao período 2007/2008. Para as exportações, o volume previsto para 2019 é de 32,6 milhões de toneladas.

O etanol, produzido no Brasil, a partir da cana-de-açúcar, também conta com projeções positivas para os próximos anos, devidas principalmente, ao crescimento do consumo interno. A produção projetada para 2019 é de 58,8 bilhões de litros, mais que o dobro da registrada em 2008. O consumo interno está projetado em 50 bilhões de litros e as exportações em 8,8 bilhões.

A política nacional para a produção da cana-de-açúcar se orienta na expansão sustentável da cultura, com base em critérios econômicos, ambientais e sociais. O programa Zoneamento Agroecológico da Cana-de-açúcar (ZAE cana) regula o

plântio da cana, levando em consideração o meio ambiente e a aptidão econômica da região. A partir de um estudo minucioso, são estipuladas as áreas propícias ao plântio com base nos tipos de clima, solo, biomas e necessidades de irrigação.

O setor sucroalcooleiro nacional é referência para os demais países produtores. A cana-de-açúcar é produzida em quase todo o País, sendo 60% em São Paulo. As demais zonas produtoras são Paraná, Triângulo Mineiro e Zona da Mata Nordestina. Líder mundial na produção de etanol da cana-de-açúcar, o Brasil possui disponibilidade de terras cultiváveis para o plântio da cana, sem prejuízo dos outros alimentos, tecnologia de produção e a estrutura na distribuição.

O Brasil, atualmente, é o maior produtor mundial de cana-de-açúcar e o principal exportador de seus derivados, porém, somente no século XX, descobriu no álcool uma opção energética viável (PRÓ-ÁLCOOL, 2009). Resumidamente, as etapas industriais para esses dois processos estão diferenciadas na Tabela 2.

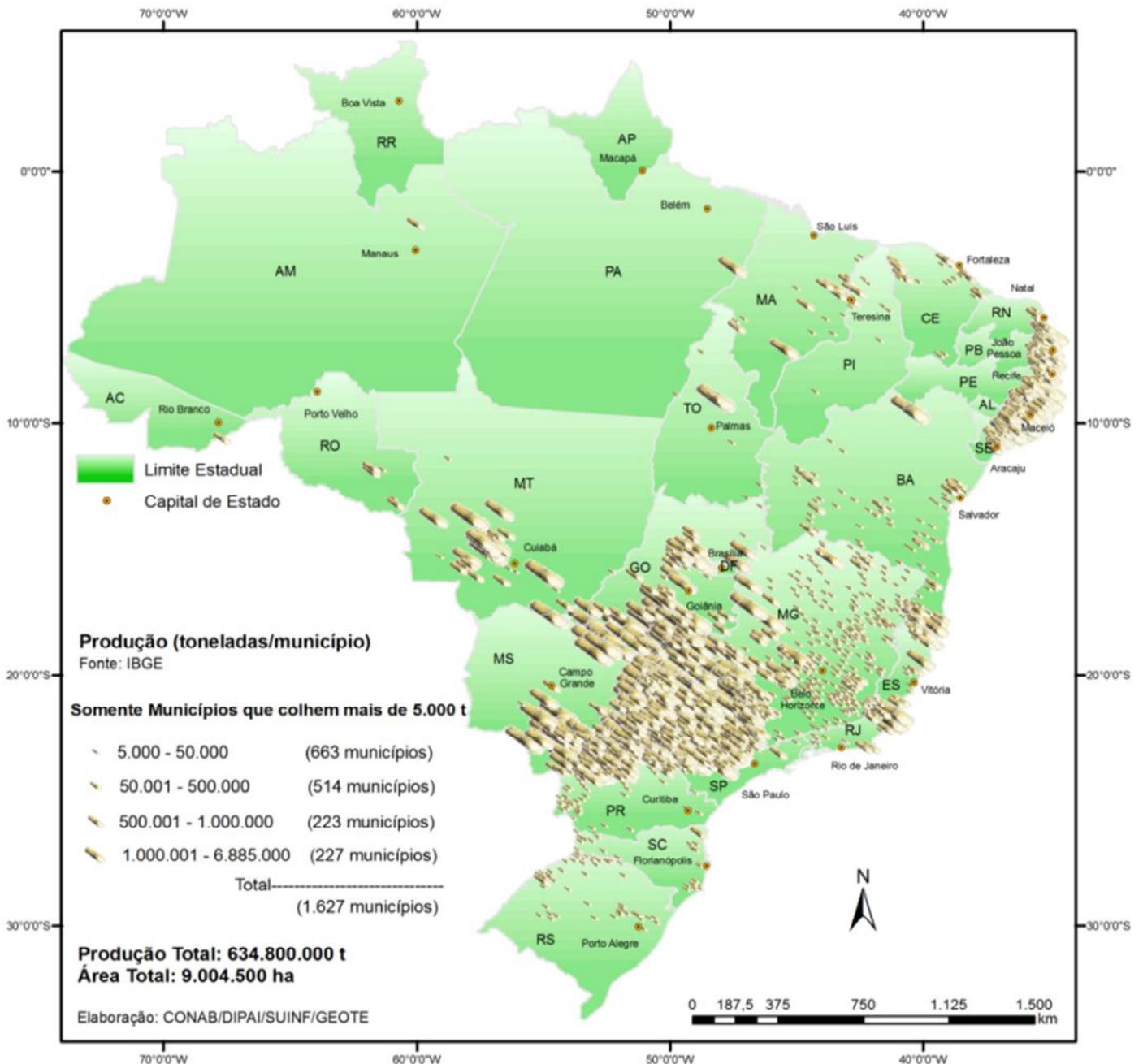
Tabela 2-Processo de produção industrial da cana-de-açúcar

<b>Produção de Açúcar</b>	<b>Produção de Etanol</b>
1. Lavagem da Cana;	Lavagem da Cana;
2. Preparo para moagem ou difusão;	Preparo para moagem ou difusão;
3. Extração do caldo: moagem ou difusão;	Extração do caldo: moagem ou difusão;
4. Purificação do caldo: peneiragem e clarificação;	Tratamento do caldo para produção do álcool;
5. Evaporação do caldo;	Fermentação do caldo;
6. Cozimento	Destilação do vinho;
7. Cristalização da sacarose;	Retificação;
8. Centrifugação: separação entre cristais e massa cozida;	Desidratação: álcool anidro ou hidratado.
9. Secagem e estocagem do açúcar.	

Fonte: Autor(adaptado de: EMBRAPA, 2010)

O País domina o ciclo completo da produção de etanol, desde a lavoura de alta produtividade até a instalação dos equipamentos para as destilarias que estão gerando esse biocombustível, a partir da fermentação do caldo extraído da cana-de-açúcar, Figura 7.

Figura 7-Produção brasileira de cana-de-açúcar-safra 2014



Fonte: MAPA-2014

### 2.2.1 A cana-de-açúcar no Brasil

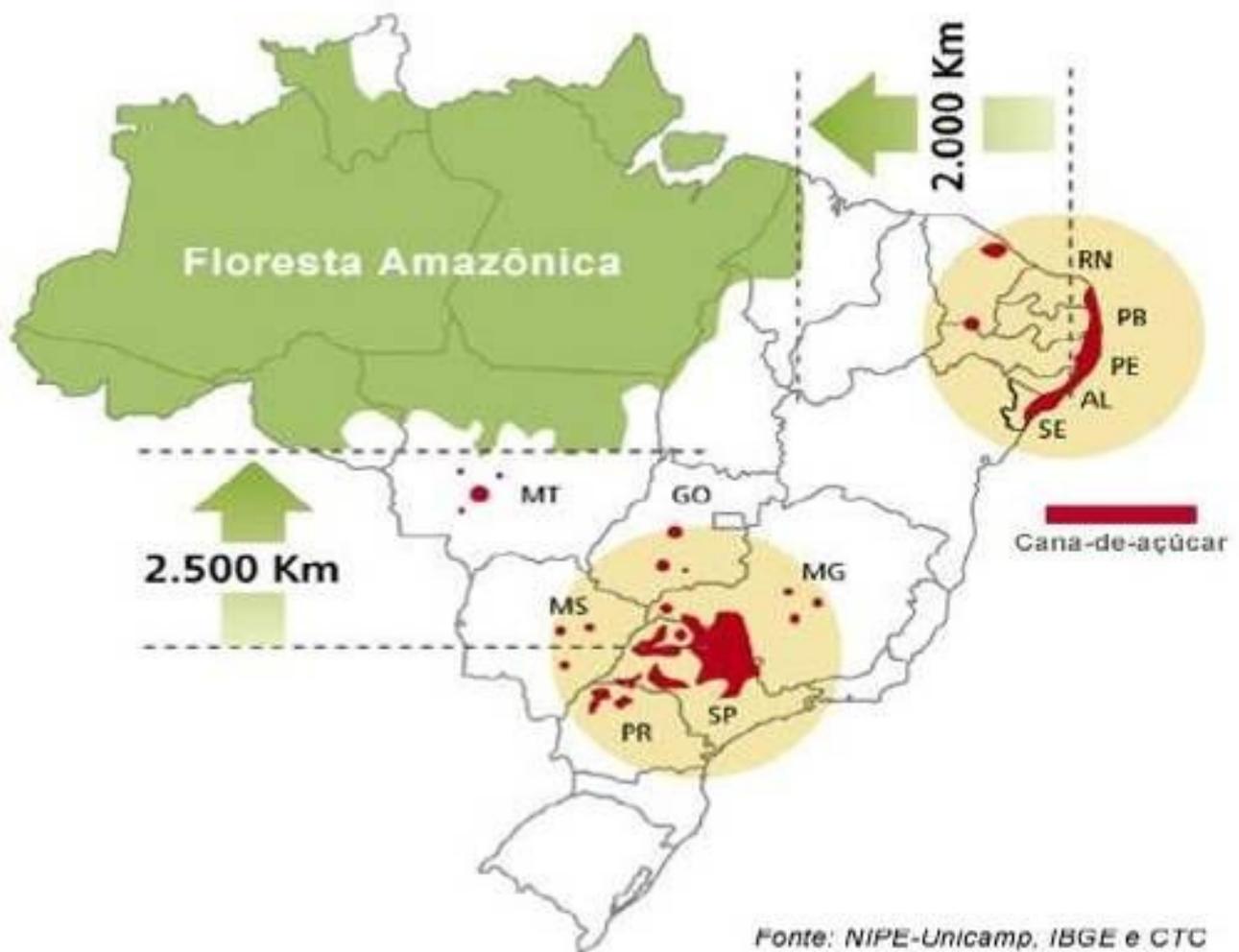
O Brasil é responsável pela produção de cerca de 53% do álcool etílico consumido no planeta e é o maior produtor mundial de açúcar, com 61% das exportações de açúcar de cana no mundo (MAPA, 2009).

A energia de biomassa é aquela fornecida por materiais de origem vegetal renovável ou obtida pela decomposição de dejetos. Atualmente, são conhecidas diversas

fontes renováveis de biomassa como: lenha, carvão vegetal, babaçu, óleos vegetais, resíduos vegetais, sisal, biogás, casca de arroz, cana-de-açúcar, bagaço da cana, palha e álcool (FIESP/CIESP, 2001). Pode-se destacar a cultura da cana-de-açúcar como uma cultura de alta eficiência de fotossíntese, portanto, com grande produção de biomassa por unidade de área.

A cultura da cana-de-açúcar representa uma das principais atividades agrícolas do país e ocupa uma área plantada de cerca de 8,4 milhões de hectares, distribuída por grande parte do território nacional (CONAB, 2011). A Região Centro-Sul responde por mais de 85% da produção do setor sucroalcooleiro, sendo São Paulo o principal estado produtor (Figura 8).

Figura 8-Mapa da distribuição da cana-de-açúcar no Brasil.



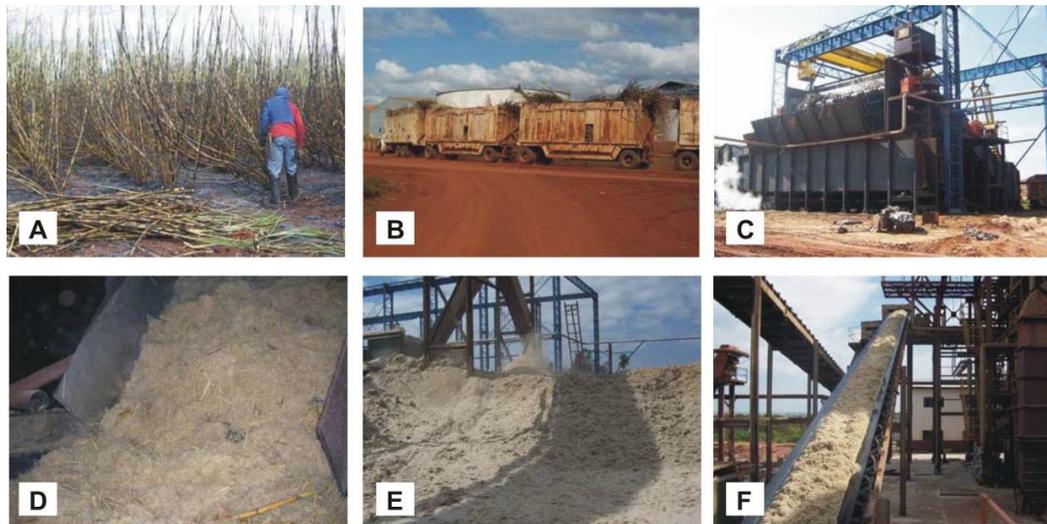
Segundo Sartori e Florentino (2002), a biomassa residual do cultivo de cana-de-açúcar é representada por folhas, palhas, ponteiros e frações de colmo que somam uma produção aproximada de 108 milhões de toneladas por ano; quantidade que permitiria a produção de 10,2 MWh de energia. No entanto, o bagaço é o único subproduto da cana-de-açúcar utilizado para geração de energia por meio da cogeração. Com a mudança do tipo de colheita realizada, de manual para mecânica, até 2017, o percentual de palha misturada ao bagaço deve aumentar a produção de energia gerada e, conseqüentemente, a geração de cinza residual.

Segundo Moreira e Goldemberg (1999), cerca de 450 a 500 kg de vapor são gerados a partir de uma tonelada de cana-de-açúcar. Em média, cada tonelada de cana processada requer cerca de 12 kWh de energia elétrica, o que pode ser gerado pela queima do bagaço. Como os custos de geração são competitivos com os do sistema convencional de suprimento, a cogeração possibilita a auto-suficiência do setor em termos de suprimento de energia elétrica (ANEEL, 2005).

As etapas do processo de corte da cana-de-açúcar até a queima do bagaço em caldeira são mostradas na Figura 9. Após o corte (a), a cana-de-açúcar é transportada para a unidade industrial (b), onde é lavada (c) para retirar a terra e impurezas provenientes da lavoura. Em seguida, é desfibrada (d) e enviada à moenda para extração do caldo. Em geral, cerca de 96% do açúcar contido na cana é extraído. O bagaço resultante, com cerca de 4% de açúcar e umidade média em torno de 50%, é transportado da moenda para depósitos a céu aberto (e, f) onde permanece até a disposição final, que pode ser a queima em caldeira, devolução às lavouras ou vendido a outras indústrias do setor, quando sua produção é maior que a capacidade de queima na caldeira (SOUZA et al., 2007).

Os impactos da atividade sucroalcooleira no meio ambiente devem ser considerados em relação à produção agrícola e à produção industrial. Esses impactos incluem a poluição do ar (localmente) com a queimada da cana e com o uso do etanol combustível; as emissões de gases de efeito estufa, em todo o ciclo de vida da cana-de-açúcar; os impactos do uso de novas áreas para plantio, inclusive na biodiversidade; os impactos na conservação do solo e a sua erosão; no uso de recursos hídricos e na qualidade da água; e no uso de defensivos e fertilizantes (RELATÓRIO UNICA, 2005).

Figura 9- Cana-de-açúcar: corte, moagem, produção e queima do bagaço.



Fonte: Souza et al., 2007.

### 2.2.2 A cana-de-açúcar em Pernambuco

A respeito da produção de cana-de-açúcar no estado de Pernambuco a quase totalidade da área de cultivo concentra-se nas mesorregiões da Zona da Mata (Setentrional e Meridional) e Litoral (Norte e Sul) Pernambucano (Figura 10), com área de 309 mil hectares de cana plantada e uma produção estimada na safra 2013/2014, correspondendo a um total de 15.130 mil toneladas de cana-de-açúcar que satisfazem o percentual de 26% de toda a produção da região Norte-Nordeste. A produção média de açúcar e álcool (2010 - 2014) na região tem sido de 1,3 mil toneladas e 333 mil m<sup>3</sup>, respectivamente (UNICA, 2015).

O litoral da Bahia e de Pernambuco foram as principais regiões produtoras de açúcar e os engenhos, que eram as grandes unidades de produção, foram rapidamente instalados nessas regiões. O engenho possuía um conjunto de instalações, dentre as quais a moenda, local onde era extraído o caldo da cana. Além do engenho, existiam a senzala (local de moradia dos escravos), a casa grande (moradia do proprietário), as estrebarias e oficinas.

A cana-de-açúcar é plantada na zona da mata de Pernambuco, na chamada zona canieira há quase 5 séculos. A área cultivada tem cerca de 12 mil km<sup>2</sup>, fica situada próxima ao Oceano Atlântico, possui solos ricos para a agricultura, onde não há ameaças de secas e os rios são perenes.



A partir de 1871, houve uma mudança gradual na agroindústria açucareira em Pernambuco, com a decadência dos antigos engenhos banguês (que produziam um açúcar de cor escura, mascavo) e sua substituição pelos engenhos centrais e usinas. Foram poucos os engenhos banguês que conseguiram sobreviver até a segunda metade do Século XX.

A zona canavieira pernambucana já teve uma boa malha ferroviária, composta pelas ferrovias da antiga Great Western e pelos ramais construídos pelas usinas para o transporte da cana. No entanto, a partir da metade da década de 1960, as ferrovias ficaram abandonadas sendo substituídas pelas rodovias.

A primeira usina implantada em Pernambuco foi a de São Francisco da Várzea, cuja primeira moagem aconteceu em 1875. Pernambuco já chegou a ter mais de cem usinas. Atualmente, no entanto, existem apenas cerca de 38, algumas, inclusive, encontram-se paralisadas ou desativadas.

O início da decadência da economia açucareira deu-se na segunda metade do Século XVI e teve ligação direta com a concorrência da produção antilhana. Após serem expulsos do Brasil, em 1654, os holandeses montaram um complexo produtor de açúcar nessa região, onde desenvolveram modernas técnicas e aumentaram a produtividade com um menor preço para o mercado.

O Brasil, que até então detinha o monopólio do açúcar, não resistiu à concorrência e passou a ocupar a quinta posição dentre os principais produtores, apenas recuperando uma posição de destaque no final do Século XVIII.

Foi em Pernambuco, porém, que ela floresceu, encontrando condições ideais para seu desenvolvimento nas terras úmidas em massapê. Em 1553, Duarte Coelho Pereira trouxe também da Ilha da Madeira, a chamada cana crioula, que durante três séculos, foi a variedade dominante cultivada em Pernambuco. Há indicações que já havia anteriormente, cultura de cana-de-açúcar nas terras de Itamaracá.

O Brasil precisou fazer modificações na sua produção, construindo ferrovias e implantando modernos engenhos de açúcar.

Nas últimas décadas do Século XIX, alguns proprietários mais ricos e empreendedores, melhoraram as condições técnicas dos seus engenhos, com a implantação de máquinas para a produção do açúcar cristal. Esses engenhos modernos seriam chamados de engenhos centrais e usinas.

Os engenhos centrais não tinham diferença do ponto de vista técnico das usinas, mas sim do ponto de vista econômico: geralmente pertenciam a uma sociedade, não possuíam terras e não desenvolviam atividades agrícolas.

A partir de 1871, houve uma mudança gradual na agroindústria açucareira em Pernambuco, com a decadência dos antigos engenhos banguês (que produziam um açúcar de cor escura, mascavo) e sua substituição pelos engenhos centrais e usinas. Foram poucos os engenhos banguês que conseguiram sobreviver até a segunda metade do Século XX.

A zona canavieira pernambucana já teve uma boa malha ferroviária, composta pelas ferrovias da antiga Great Western e pelos ramais construídos pelas usinas para o transporte da cana. No entanto, a partir da metade da década de 1960, as ferrovias ficaram abandonadas sendo substituídas pelas rodovias.

A primeira usina implantada em Pernambuco foi a de São Francisco da Várzea, cuja primeira moagem aconteceu em 1875. Pernambuco já chegou a ter mais de cem usinas. Atualmente, no entanto, existem apenas cerca de 38, algumas, inclusive, encontram-se paralisadas ou desativadas. Abaixo, na Tabela 3, pode-se acompanhar a evolução da área plantada e da área colhida, em Pernambuco, no Nordeste e no Brasil.

Tabela 3-Área Plantada X Área colhida com cana-de-açúcar, 2013-2015

Local	2013		2014		2015	
	Área Plantada	Área Colhida	Área Plantada	Área Colhida	Área Plantada	Área Colhida
<b>Pernambuco</b>	302.725	296.823	320.171	302.932	320.942	309.490
<b>Norte-Nordeste</b>	1.257.593	1.247.837	1.324.204	1.246.083	1.248.932	1.152.007
<b>Brasil</b>	10.223.043	10.165.166	10.645.658	9.887.251	10.870.647	9.695.774

Fonte: autor adaptado de ÚNICA a partir de informações do IBGE.

### 2.2.3 Cinza do bagaço de cana-de-açúcar

O bagaço é o resíduo sólido gerado durante a extração do caldo da moagem da cana-de-açúcar para a produção de açúcar e álcool. Sua composição química varia

conforme a espécie de cana-de-açúcar cultivada, os tipos de herbicidas e de fertilizantes e os fatores naturais como clima, solo e água (CORDEIRO, 2006).

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

Alguns trabalhos têm sido realizados para aproveitar o bagaço de cana, a cinza do bagaço de cana e a cinza da palha da cana, buscando novas soluções que possam agregar valor aos resíduos, como se destaca na Tabela 4.

Tabela 4-Resíduos gerados pela produção da cana-de-açúcar.

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

Fonte: Autor adaptado de FIESP (2001) e FREITAS (2005) apud NUNES (2009).

O bagaço é queimado em caldeiras, através de um sistema denominado cogeração, este processo consiste na produção de vapor que será fornecido às turbinas de acionamento mecânico, como bombas, moendas, desfibriladores e, também, para os

geradores de energia elétrica; e a demanda no processamento do caldo é suprida pelo vapor que sai das turbinas, denominado vapor de escape (FIOMARI, 2004).

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

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

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

Para a estimativa de geração de resíduos, FIESP/CIESP (2001) adotaram-se as seguintes proporções: para cada tonelada de cana produzida, são gerados 260 kg de resíduo seco de bagaço; e cada tonelada de bagaço que alimenta as caldeiras das usinas, considerando seu percentual de uso em 95%, gera 23,8 kg de cinza de bagaço de cana-de-açúcar. Esta, juntamente com as tortas de filtros e com a palha é encaminhada para a adubação nas próprias lavouras, apesar de ser um material pobre em nutrientes minerais.

Cook apud Paula (2006) afirma que propriedades da CBC dependem fortemente das condições de queima, sendo que as modificações ocorridas no bagaço da cana-de-açúcar durante o processo podem ser descritas da seguinte maneira:

- Inicialmente, a perda de massa ocorrida à temperaturas até 100°C resulta da evaporação da água absorvida;
- À cerca de 350°C inicia a ignição do material mais volátil, dando início à queima do bagaço da cana-de-açúcar;
- Entre 400 e 500°C, o carbono residual é oxidado, sendo neste estágio observada a perda mais substancial da massa. Após esta etapa, a cinza torna-se rica em sílica amorfa;

- O emprego de temperaturas acima de 700°C pode levar à formação de quartzo, e níveis ainda mais elevados de temperatura podem acarretar na formação de outras formas cristalinas;
- Acima de 800°C, a sílica presente na CBC é essencialmente cristalina.

### 2.2.3.1 Composição Química

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

Consta na Tabela 5 a caracterização química da cinza do bagaço de cana-de-açúcar pesquisada por Santos e Formagini (2008) e que foi coletada na Usina Santa Olinda do Grupo José Pessoa, localizada no município de Sidrolândia – MS.

Tabela 5-Composição química da cinza do bagaço de cana

Composição Química (%)							
SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO	MgO	SO <sub>3</sub>	Perda ao fogo	Umidade
<b>83,80</b>	1,14	1,14	0,38	0,35	0,09	8,02	1,00

Fonte: Autor, adaptado de SANTOS; FORMAGINI, 2008

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

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

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

A Figura 11 mostra o bagaço e as cinzas produzidas nas caldeiras com tons mais escuros, que caracterizam cinzas com alto teor de carbono, e com tons mais brancos, que indicam a combustão completa.

Figura 11-Bagaço de cana-de-açúcar (a) e diferentes cinzas residuais geradas após a queima do bagaço em caldeira: cinza escura com alto teor de carbono, característico de combustão incompleta(b), cinza com menor teor de carbono (c) e cinza gerada após a combustão completa (d).



Fonte: CORDEIRO, 2006.

#### 2.2.3.2 Perda ao fogo

A perda ao fogo, no caso de aditivos minerais, geralmente é atribuída à quantidade de carbono porque a umidade e os materiais voláteis já foram eliminados após a queima, restando apenas matéria orgânica na forma de carbono livre.

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

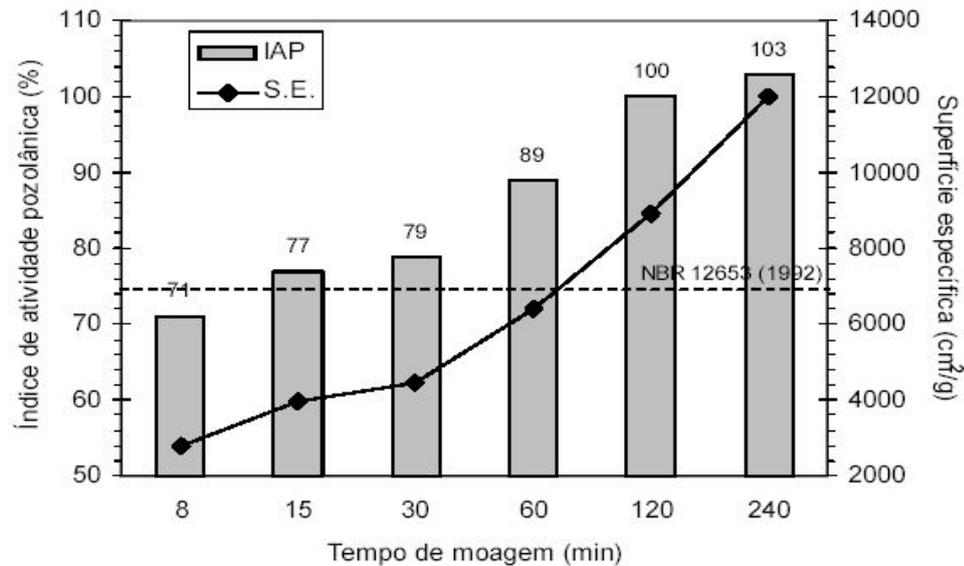
#### 2.2.3.3 Moagem e finura

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

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

A Figura 12 mostra a variação do índice de atividade pozolânica com cimento Portland (IAP) em função do tempo de moagem e superfície específica.

Figura 12-Variação do índice de atividade pozolânica com cimento Portland (IAP) em função do tempo de moagem e superfície específica.



Fonte: CORDEIRO et al, 2004

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

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

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

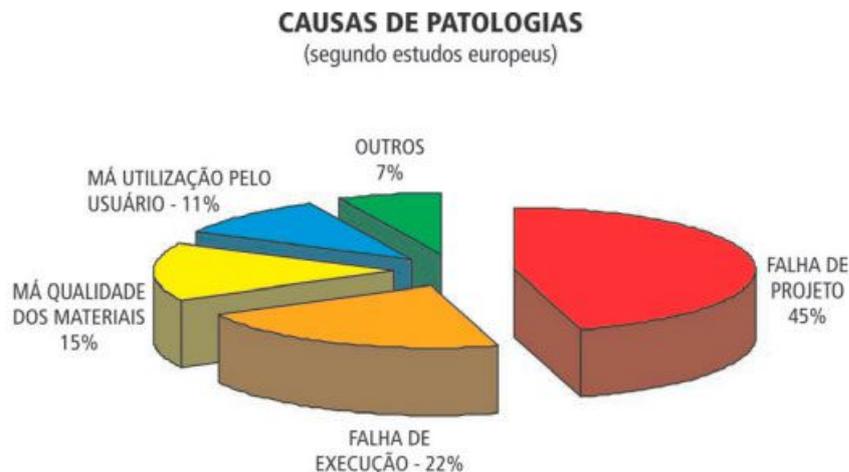
### 2.3 Estudo da durabilidade dos concretos

As obras se deterioram com o passar do tempo e podem chegar ao fim de sua vida útil antes do previsto. O estudo dos defeitos das obras tem grande importância nos aspectos de segurança, econômico e histórico.

Os critérios utilizados para avaliar a durabilidade de um material são baseados nos processos de deterioração. Esses processos estão associados a fenômenos físico-químicos que ocorrem entre os constituintes do concreto e os agentes agressivos, em geral presentes na água, tendo se como exemplos o ingresso de cloretos e sulfatos, os ciclos de molhagem-secagem, a carbonatação, a reação álcali-agregado, entre outros (MACEDO et al., 2009).

As características das manifestações patológicas são apresentadas em forma de trincas, fissuras, carbonatação, corrosão, descolamentos de revestimentos e deformações até mesmo bolores e mofo em revestimentos entre outros. A maioria das patologias em edificações ocorre por consequência de falhas de execução e pela falta de controle dos materiais empregados na construção e podem ser vistas na Figura 13.

Figura 13--Principais causas de patologias do concreto



Fonte: <http://construfacilrj.com.br/patologia-da-construcao-civil-principais-causas>

O Brasil ainda está atrasado no estudo das patologias, havendo poucas pesquisas feitas nessa área. Na Tabela 6, encontram-se alguns fatores que influenciam na deterioração do concreto:

Tabela 6-Classe de agressividade ambiental no concreto

Classe de agressividade ambiental	Agressividade	Classificação geral do tipo de ambiente para efeito de projeto	Risco de deterioração da estrutura
I	Fraca	Rural	Insignificante
		Submersa	
II	Moderada	Urbana <sup>1), 2)</sup>	Pequeno
III	Forte	Marinha <sup>1)</sup>	Grande
		Industrial <sup>1), 2)</sup>	
IV	Muito forte	Industrial <sup>1), 3)</sup>	Elevado
		Respingos de maré	

<sup>1)</sup> Pode-se admitir um microclima com uma classe de agressividade mais branda (um nível acima) para ambientes internos secos (salas, dormitórios, banheiros, cozinhas e áreas de serviço de apartamentos residenciais e conjuntos comerciais ou ambientes com concreto revestido com argamassa e pintura).

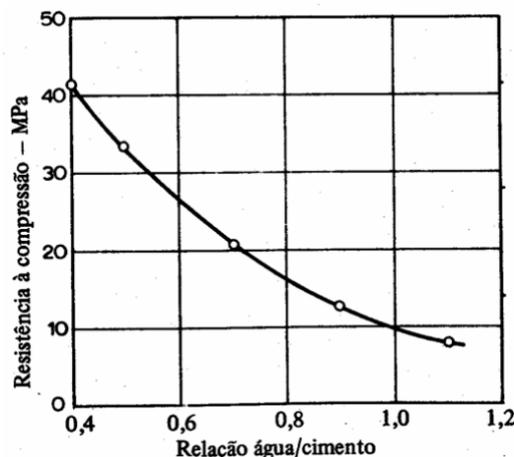
<sup>2)</sup> Pode-se admitir uma classe de agressividade mais branda (um nível acima) em: obras em regiões de clima seco, com umidade relativa do ar menor ou igual a 65%, partes da estrutura protegidas de chuva em ambientes predominantemente secos, ou regiões onde chove raramente.

<sup>3)</sup> Ambientes quimicamente agressivos, tanques industriais, galvanoplastia, branqueamento em indústrias de celulose e papel, armazéns de fertilizantes, indústrias químicas.

Fonte: NBR 6118:2014

No processo de fabricação do concreto, a quantidade de água utilizada deve obedecer a uma relação água/cimento, esta relação influencia diretamente nas principais características do concreto, como porosidade e resistência à compressão. Na Figura 14 está apresentada a resistência à compressão em função da relação água/cimento.

Figura 14-Relação água/cimento x Resistência à compressão.

Fonte: <http://www.comunidade-da-construcao.com.br/>

## 2.4 Desenvolvimento sustentável

É o desenvolvimento que procura satisfazer as necessidades da geração atual, sem comprometer a capacidade das gerações futuras de satisfazerem as suas próprias

necessidades, significa possibilitar que as pessoas, agora e no futuro, atinjam um nível satisfatório de desenvolvimento social e econômico e de realização humana e cultural, fazendo, ao mesmo tempo, um uso razoável dos recursos da terra e preservando as espécies e os habitats naturais (Figura 15).

Figura 15-Sustentabilidade



Fonte: <http://infap.org.br>

O desenvolvimento sustentável pode ser dividido, como podemos ver na Figura 16, em três componentes: a Sustentabilidade Ambiental, Sustentabilidade Econômica e Sustentabilidade Sócio-Política.

Figura 16-Divisão do desenvolvimento sustentável.



Fonte: <http://www.portalresiduossolidos.com>

A **Sustentabilidade Ambiental** consiste na manutenção das funções e componentes do ecossistema, de modo sustentável, podendo igualmente designar-se como a capacidade que o ambiente natural tem de manter as condições de vida

para as pessoas e para os outros seres vivos, tendo em conta a habitabilidade, a beleza do ambiente e a sua função como fonte de energias renováveis.

A **Sustentabilidade Econômica** é um conjunto de medidas e políticas que visam à incorporação de preocupações e conceitos ambientais e sociais.

Aos conceitos tradicionais de maior valor econômico, essas medidas e políticas são adicionadas com o objetivo de levar em conta os parâmetros ambientais e socioeconômicos, criando assim uma interligação entre os vários setores. O lucro não é somente medido financeiramente, mas também ambiental e socialmente, o que incentiva um uso mais correto das matérias primas e dos recursos humanos. A gestão mais eficiente dos recursos naturais, de forma a garantir uma exploração sustentável dos mesmos, ou seja, a sua exploração sem colocar em causa o seu esgotamento, sendo introduzidos elementos como nível ótimo de poluição ou as externalidades ambientais, acrescentando aos elementos naturais um valor econômico.

A **Sustentabilidade Sócio-Política** centra-se no equilíbrio social, tanto no desenvolvimento social como socioeconômico. É um veículo de humanização da economia, e, ao mesmo tempo, pretende desenvolver o tecido social nos seus componentes humanos e culturais. Neste sentido, foram desenvolvidos dois grandes planos: a Agenda 21 e as Metas de Desenvolvimento do Milênio.

Em 1987 alguns setores da sociedade buscavam sinalizar para a humanidade de forma sistemática que era o momento, mesmo que tardio, de se rever o nosso comportamento perante o meio-ambiente. A definição clássica de desenvolvimento sustentável foi estabelecida pela ONU no Relatório de Brundtland em 1987 (para a construção sustentável da Agenda 21, 2000): é o “desenvolvimento que vai de encontro às necessidades do presente sem comprometer a habilidade de futuras gerações de encontrar suas próprias necessidades”.

Para ser alcançado, o desenvolvimento sustentável depende de planejamento e do reconhecimento de que os recursos naturais são finitos. Esse conceito representou uma nova forma de desenvolvimento econômico, que leva em conta o meio ambiente.

O uso da areia para construção acha-se dividido entre os subsetores de revenda (lojas de materiais de construção), concreto pré-misturado, fabrico de pré-moldados de concreto, argamassa, concreto asfáltico e material para compor a base/sub-base de rodovias. Segundo o site da Associação Nacional das Entidades de Produtores de Agregados para Construção Civil (ANEPAC), o consumo de areia está dividido em:

- 35% para argamassa;
- 20% concreteiras;
- 15% construtoras;
- 10% pré-fabricados;
- 10% revendedores/lojas;
- 5% pavimentadoras/usinas de asfalto;
- 3% órgãos públicos e
- 2% outros.

Tendo em conta o peso que os usos da areia com aglomerantes têm na quantidade total consumida daquele insumo, torna-se muito relevante a análise da substituição dos produtos finais para o mercado da areia. Sua produção, apresentada na Tabela 7, vem crescendo e por este motivo, devemos observar a possibilidade de sua substituição para diminuir o impacto ambiental em nosso planeta que a falta deste recurso natural pode acarretar.

Sendo assim, é importante avaliar que a substituição do concreto por materiais como blocos e tijolos de cerâmica vermelha, aço, alumínio, vidro e mesmo plásticos tem um impacto direto na demanda da areia.

Tabela 7-Produção de areia

Discriminação		Unidade	2011 <sup>(n)</sup>	2012 <sup>(n)</sup>	2013 <sup>(p)</sup>
Produção <sup>(1)</sup>	Areia para Construção	(t)	346.772.000	368.957.000	377.247.785
Importação <sup>(2)</sup>	Bens Primários	(t)	-	-	-
Exportação <sup>(2)</sup>	Bens Primários	(t)	-	-	-
Consumo Aparente <sup>(3)</sup>	Areia para Construção	(t)	346.772.000	368.957.000	377.247.785
Preço médio <sup>(4)</sup>	Areia Fina	(R\$/t)	32,13	30,72	30,37
	Areia Grossa	(R\$/t)	32,44	32,99	33,49
	Areia Média	(R\$/t)	32,19	31,24	32,21

Fontes: DNPM/DIPLAM; MIDC/SECEX; CAIXA/IBGE

Muitas vezes, desenvolvimento é confundido com crescimento econômico, que depende do consumo crescente de energia e recursos naturais. Esse tipo de desenvolvimento tende a ser insustentável, pois leva ao esgotamento dos recursos naturais dos quais a humanidade depende.

Atividades econômicas podem ser encorajadas em detrimento da base de recursos naturais dos países. Desses recursos depende não só a existência humana e a diversidade biológica, como o próprio crescimento econômico.

O desenvolvimento sustentável sugere qualidade em vez de quantidade, com a redução do uso de matérias-primas e produtos e o aumento da reutilização e da reciclagem.

### 3. PROGRAMA EXPERIMENTAL

---

Neste capítulo são apresentadas as metodologias utilizadas para caracterizar os materiais empregados na pesquisa.

Serão expostos os detalhes da coleta e caracterização das cinzas residuais do bagaço de cana-de-açúcar, bem como algumas características dos materiais complementares utilizados na confecção dos concretos, como cimento portland, agregado miúdo (areia) e agregado graúdo (brita).

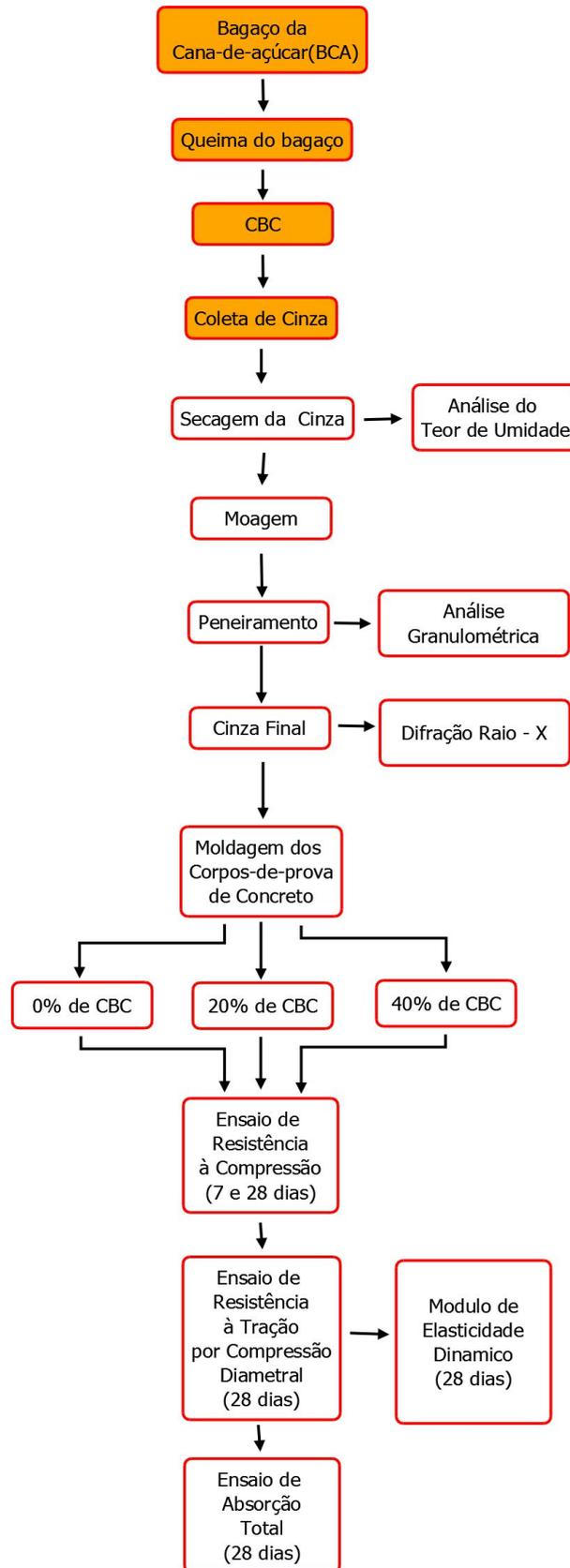
Expõem-se o estudo efetuado, incluindo a descrição da cinza do bagaço de cana-de-açúcar coletada e a metodologia de pesquisa. Para atingir os objetivos específicos deste projeto, adotou-se a seguinte metodologia:

- Coleta de amostra de cinza do bagaço da cana-de-açúcar proveniente de usina da região;
- Secagem em estufa da cinza do bagaço da cana-de-açúcar;
- Moagem da cinza do bagaço da cana-de-açúcar;
- Peneiramento da cinza do bagaço da cana-de-açúcar;
- Análise granulométrica da cinza do bagaço da cana-de-açúcar;
- Ensaio por Difração por Raio X;
- Ensaio de resistência à compressão;
- Ensaio de tração por compressão diametral;
- Ensaio de Absorção total;
- Ensaio de Módulo de Elasticidade Dinâmico.

O estudo laboratorial deste trabalho foi realizado no Laboratório de Materiais do Departamento de Engenharia Civil da Universidade Católica de Pernambuco, na Cidade do Recife e no Laboratório de Tecnologia das Construções do IFPE Campus Recife, com o auxílio dos seus laboratoristas e supervisão de Doutores das duas Instituições de Ensino Superior envolvidas neste projeto.

A Figura 17 mostra um diagrama de blocos esquematizando a rota experimental desenvolvida neste trabalho.

Figura 17-Rota experimental desenvolvida neste trabalho.



FONTE: Autor, 2016

### 3.1 Material utilizado

#### 3.1.1 Cimento Portland

O Cimento utilizado foi o CP III-40 RS (Figura 18) que apresenta em sua composição Silicatos de cálcio, alumínio e ferro, sulfato de cálcio e filer carbonático, sendo assim, uma boa opção para uso geral na construção civil em cidades litorâneas.

Figura 18-Cimento Portland utilizado:CP III-40 RS



Fonte: o Autor, 2016

Segue, na Tabela 8, composição dos diversos tipos de cimentos Portland.

Tabela 8-Composição dos cimentos comercializados no Brasil

Tipo de Cimento Portland	Sigla	Norma Brasileira	Composição(% em massa)			
			Clínquer + gesso	Escória granulada de alto-forno	Material Pozolânico	Material Carbonático
Comum	CP I	NBR 5732 (1991)	100			
	CP I-S		99-95		1-5	
Composto	CP II-E	NBR 11578 (1991)	94-56	6-34		0-10
	CP II-Z		94-76		6-14	0-10
	CP II-F		94-90			6-10
Alto-forno	CP III	NBR 5735 (1991)	65-25	35-70		0-5
Pozolânico	CP IV	NBR 5736 (1991)	85-45		15-50	0-5
Alta resistência inicial	CP V - ARI	NBR 5733 (1991)	100-95			0-5

Fonte: autor, adaptado de ABCP, 2002.

### 3.1.2 Água

A água utilizada para a confecção dos concretos foi a água potável disponibilizada pela COMPESA (Companhia de Pernambucana de Saneamento) na região metropolitana de Recife. Neste trabalho utilizou-se uma relação água/cimento de 0,50, após combinações com o traço base 1:2:3 utilizado inicialmente e que, após alguns ajustes, passou a ser considerado 1:1,54:2,31.

### 3.1.3 Brita

O Agregado graúdo utilizado para a confecção dos concretos tem diâmetro máximo de 19mm (Figura 19) e foi proveniente da região metropolitana de Recife. Este material encontrava-se armazenado no pátio do IFPE e sua caracterização foi baseada na NBR 7211 (2009), que fixa os limites granulométricos do agregado graúdo por meio das zonas em que o mesmo se enquadra.

Figura 19- Brita 19 mm, utilizada no experimento



Fonte: autor, 2016

### 3.1.4 Areia

Na confecção dos concretos serão empregados como agregado miúdo, areia natural (Figura 20), quartzosas, comum lavada, disponível na região metropolitana de Recife e armazenada no pátio do IFPE, próximo ao laboratório onde foram moldados os concretos, e cuja caracterização foi baseada na NBR 7211 (2009), que fixa os limites granulométricos do agregado.

Figura 20-Areia média, utilizada no experimento



Fonte: autor, 2016

### 3.1.5 Aditivo superplastificante

Para a moldagem das argamassas e concretos, fez-se necessário o uso de aditivo superplastificante com o intuito de manter fixa a consistência (flow) em todos os traços sem alterar a relação água/cimento. O aditivo redutor de água escolhido foi Viscocrete60HE, do Fabricante SIKA, que é um aditivo líquido de pega normal de terceira geração. A dosagem máxima recomendada pelo fabricante para concreto plástico é de 2% sobre o peso de cimento.

### 3.1.6 Cinza do bagaço da cana-de-açúcar

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

Figura 21-CBC utilizada na pesquisa.



Fonte: autor, 2016

## 3.2 Método

### 3.2.1 Coleta da CBC

As amostras de CBC foram coletadas numa usina, em Vitória de Santo Antão, no Estado de Pernambuco, conforme mapa da Figura 22, numa empresa que tem mais de 40 anos de experiência e destaca-se no segmento agroindustrial pela diversidade e capacidade produtiva atendendo ao mercado nacional e internacional de açúcar, álcool, gás carbônico, energia, combustíveis, armazenagem e indústria química. As cinzas foram estocadas em sacos plásticos vedados e armazenadas em laboratório para posterior caracterização.

Figura 22-Mapa do local de retirada da CBC.



Fonte: <https://www.google.com.br/maps>

### 3.2.2 Secagem

Este processo se deu no Laboratório de Materiais de Construção da Universidade Católica de Pernambuco, onde a cinza coletada primeiramente foi armazenada em sacos.

A CBC utilizada foi colocada em estufa, Figura 23, durante 24h à 110°C em bandejas metálicas. Ao final deste período, aguardou-se a temperatura estabilizar e chegar próximo aos 23°C para se dar início a etapa seguinte, a moagem.

Figura 23-Estufas utilizadas para secagem



Fonte: autor, 2016

### 3.2.3 Moagem

Esta etapa diz respeito ao estudo sobre a moagem em relação a finura da CBC, para definir o tempo ideal de moagem através de alguns ensaios efetuados:

- Massa específica, seguindo a NBR NM 23 (2001);
- Finura (% retida na peneira # 0,045 mm) pela NBR 12826 (2014);
- Superfície específica por Blaine, conforme NBR 16372 (2015).

As cinzas foram moídas por 20 minutos na rotação de 60 RPM, em moinho de bola da marca Karlkolb, Figura 24 (a), para homogeneização. Após moagem a CBC apresenta aspecto homogêneo, Figura 24 (b), com maior superfície específica.

Figura 24-Moinho de bolas(a) e aspecto final da CBC após moagem(b).



Fonte: autor, 2016

### 3.2.4 Índice de finura

A NBR 12826 (2014) prescreve o método para a determinação do índice de finura do cimento Portland e outros materiais em pó, por meio da peneira 45 mm (# 325), acopladas em peneirador aerodinâmico. Este método indica resultados qualitativos por fornecer dados que mostram a uniformidade das partículas.

### 3.2.5 Ensaio de teor de umidade da cinza

Para o ensaio de teor de umidade foram recolhidas amostras separadas antes de pôr as cinzas na estufa à 110°C. Estas amostras foram postas em bandejas metálicas e submetidas à 110°C durante 24h na estufa.

As bandejas utilizadas neste ensaio foram pesadas primeiramente secas e depois com pequenas amostras da cinza ainda úmida.

Após a retirada do conjunto (bandeja + amostra) da estufa e do seu resfriamento, foram pesadas novamente obtendo agora a massa seca da cinza.

$$H(\%) = \frac{(MU1 - MS1) \times 100}{MU1 - M1}$$

Onde:

“H” é o teor de umidade do material em porcentagem;

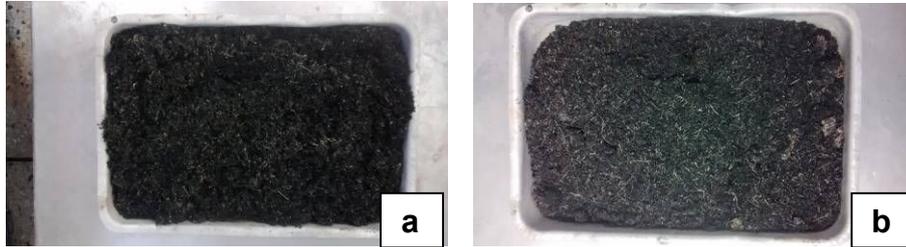
“M1” é a massa da bandeja seca em gramas;

“MU1” é a massa da amostra + bandeja com umidade natural em gramas;

“MS1” é a massa da amostra + bandeja seca em estufa após 24h à 110°C;

A amostra foi pesada antes de ser colocada na estufa (Figura 25a) e depois do seu resfriamento(Figura 25b).

Figura 25- Amostra úmida (a) e Amostra seca(b)



Fonte: autor, 2016

### 3.2.6 Análise granulométrica

As composições granulométricas dos agregados naturais foram determinadas segundo a NBR NM 248 (2003). A importância deste ensaio está associada ao controle da redução e da distribuição do tamanho das partículas de cinza e à otimização do seu processo de moagem.

Com o término do processo de secagem, as cinzas foram, primeiramente, peneiradas para retirada de resíduos, como palha e bagaço. E, logo após, submetidas à um agitador mecânico com um sistema de peneiras com granulometrias passantes entre 4,8 mm e 0,300 mm, como mostra a Figura 26.

Figura 26- Peneirador mecânico(a) e Peneiras(b)



Fonte: autor, 2016

### 3.2.7 Difração de raios-X

A técnica de difratometria de Raios X possui caráter qualitativo e/ou quantitativo, identificando as fases cristalinas presentes no material analisado. O estudo dos picos presentes no difratograma, por comparação com bancos de dados específicos, permite a avaliação sobre o quanto uma amostra é amorfa ou cristalina, como também sua análise, de forma qualitativa, em relação a outros materiais de mesma natureza.

A base teórica da análise por difração está associada ao fato de que, na grande parte dos sólidos (cristalinos), os átomos se ordenam em planos cristalinos separados entre si por distâncias da mesma ordem de grandeza dos comprimentos de onda dos raios X. Desta forma, quando um feixe de raios X incide sobre um material cristalino, um outro feixe de raios difratados é produzido (CORDEIRO, 2006).

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

A técnica de DR-X foi utilizada na análise em duas amostras de CBC in natura. As análises foram realizadas no Laboratório Cristalografia de Raios X do Centro de Tecnologias Estratégicas do Nordeste (CETENE), localizada na Cidade Universitária de Recife, criada em 2005 para apoiar o desenvolvimento tecnológico do Nordeste. O Difratômetro de Raio-X (DRX) foi utilizado para determinar a mineralogia da cinza do bagaço da cana-de-açúcar.

Utilizou-se um Difratômetro de Raios-X (Figura 27) da marca Bruker, modelo D8 Advance Davinci e as condições para realização das análises foram:

- i) radiação: Cu K $\alpha$ ;
- ii) tensão: 40Kv;
- iii) corrente: 40mA;
- iv) varredura com passo de 0,05° 2 $\theta$ ;
- v) tempo de coleta: 1,0 s; e
- vi) intervalo de varredura: 5° a 90° (2 $\theta$ ).

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

Figura 27- Difratorômetro de Raios-X



Fonte: autor, 2016

O método se dá pela medição do desvio da incidência de feixe primário de Raio-X na amostra, onde os ângulos de difração estão relacionados com a distância entre os planos dos materiais cristalinos presentes na amostra, de acordo com a Lei de Bragg abaixo:

$$n\lambda = 2d \sin \theta$$

Onde:

$n$ : número inteiro;

$\lambda$ : comprimento de onda do Raio-X;

$d$ : distância entre planos do cristal;

$\theta$ : ângulo entre o feixe incidente e o refratado.

### 3.2.8 Confeção do concreto

Os concretos desta pesquisa foram produzidos segundo a norma NBR 12821 (ABNT, 2009), no Laboratório de Materiais de Construção do IFPE Campus Recife. Para a produção do concreto, nesta fase, utilizou-se uma betoneira de 150 L seguindo um procedimento de dosagem através de um processo volumétrico, ou seja, foram utilizadas padrolas devido ao volume de material.

Com vista a obter parâmetros comparativos para a pesquisa, optou-se pela utilização de 1 traço, dividido em 3 famílias as quais se diferem pelo uso da Areia (referência) e da CBC com proporções diferentes. Foram moldadas 21 amostras para cada família estudada, sendo os corpos de prova cilíndricos de 100 x 200 mm, onde as réplicas foram mantidas em câmara úmida até as idades dos ensaios

Para estudar os concretos, foram utilizados os seguintes materiais: cimento Portland CP III-40 RS, areia quartzosa, brita basáltica, cinza do bagaço da cana-de-açúcar (CBC) e água (relação água / cimento de 0,50), no traço 1:2:3, que após alguns ajustes (acréscimo de 30% de cimento) passou a ser considerado 1:1,54:2,31 em volume. A amostra de CBC para os teores de substituição de 0%, 20% e 40% de areia por cinza.

Inicialmente jogou-se uma pasta de água e cimento na betoneira, a fim de reduzir a absorção da água, utilizada na fabricação do concreto. Os materiais misturados em betoneira de 150 dm<sup>3</sup>, à temperatura de 25 ± 3°C e umidade relativa do ar de 55 ± 15%, até a obtenção de uma mistura homogênea durante cinco minutos de mistura, aproximadamente.

A colocação de materiais na betoneira obedeceu na seguinte ordem:

1. brita (100%),
2. areia (100%),
3. cinza – nos traços com cinza – (100%),
4. água (80%); mistura por 2,5 minutos;
5. cimento (100%) e
6. restante da água (20%); mistura por mais 2,5 minutos.

Após a mistura, foi constatada uma absorção de água muito grande do material e a formação de pequenos torrões de brita e CBC, onde se verificou a necessidade de acréscimo de aditivo superplastificante para melhor homogeneização do material.

Nas análises das propriedades dos concretos no estado fresco, os ensaios foram realizados logo após a mistura na betoneira. Para a análise das propriedades no estado endurecido, foram moldados corpos de prova cilíndricos em formas metálicas e pvc, com adensamento do tipo manual.

De acordo com a NBR 5738 (2015) foi realizada a moldagem e cura dos corpos de prova. Os corpos de prova permaneceram em seus moldes por 24 horas, e depois desse período, foram desmoldados e acondicionados em câmara úmida (temperatura  $23 \pm 2$  °C e umidade relativa  $95 \pm 5\%$ ) até a idade de ensaio e/ou ruptura.

Os ensaios físico-mecânicos desenvolvidos com os concretos, no estado fresco e endurecido, e as respectivas normas técnicas utilizadas como parâmetros são apresentados na Tabela 9.

Tabela 9- Caracterização das propriedades dos concretos – Ensaio normalizados

ENSAIOS	NORMA	7 DIAS P/ FAMÍLIA	28 DIAS P/ FAMÍLIA	TOTAL P/ 3 FAMÍLIAS
<b>01-Resistência à compressão</b>	NBR 5739/2007	03 unid.	12 unid.	45 unid.
<b>02-Resistência à tração compressão diametral</b>	NBR 7222/2011	00 unid.	03 unid.	09 unid.
<b>03-Absorção total</b>	NBR 9778/2005	00 unid.	03 unid.	09 unid.
<b>04-Módulo de elasticidade</b>	ASTM C597/2009	00 unid. (idem TCD)	03 unid. (idem TCD)	09 unid. (idem TCD)
<b>Total geral</b>				63 unid.

Fonte: autor, 2016

No estudo dos concretos produzidos com a CBC em substituição ao agregado miúdo, foram selecionadas duas amostras das quatro coletadas inicialmente, com a composição final dos traços apresentada na Tabela 10.

A introdução de aditivo superplastificante nas incorporações de 0,5% foi necessária para que se mantivesse a relação água/cimento constante.

Tabela 10- Composição final dos traços de concreto

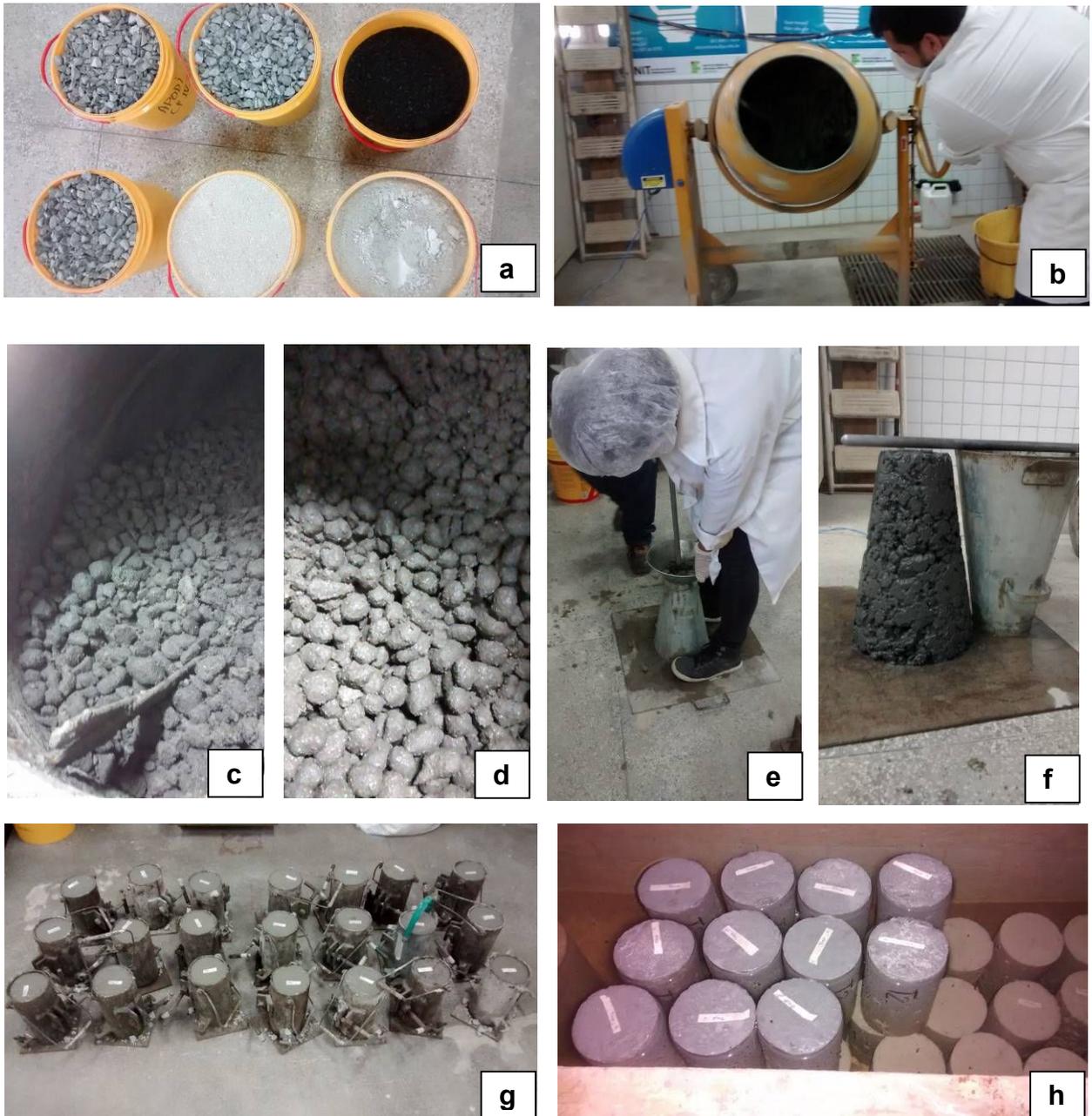
Traço	Cimento	Areia	CBC	Brita	Aditivo (%)	Relação a/c
<b>01(0%)</b>	1	1,54	0	2,31	0,0	0,50
<b>02(20%)</b>	1	1,32	0,22	2,31	0,3	0,50
<b>03(40%)</b>	1	0,93	0,61	2,31	0,9	0,50

Fonte: autor, 2016

A influência da variação dos teores de substituição da areia pela CBC foi analisada segundo o ensaio de resistência à compressão em corpos de prova cilíndricos. Por esse ensaio, foi possível avaliar o teor ótimo de sua aplicação para que as

propriedades mecânicas do concreto pudessem ser mantidas. Sendo moldados três traços, com 21 (vinte e um) exemplares cada, que foram rompidos nas idades de 7 e 28 dias. Todo o processo de separação de matéria, mistura, moldagem e cura podem ser visto, em seqüência, na Figura 28.

Figura 28-Separação de material (a), mistura (b,c e d), slump (e)(f), moldagem (g) e cura (h)



Fonte: autor, 2016

### 3.2.9 Resistência à compressão

A resistência à compressão do concreto foi determinada de acordo com a NBR 5739(ABNT, 2007).

Os corpos de prova foram rompidos após o capeamento, em uma prensa universal, para ensaios que apresenta velocidade de carregamento igual a 5kgf/cm<sup>2</sup>/s (Figura 29). A tensão de ruptura foi obtida por meio da seguinte expressão:

$$\sigma_c = \frac{4 \times P}{\pi \times D^2}$$

Sendo:

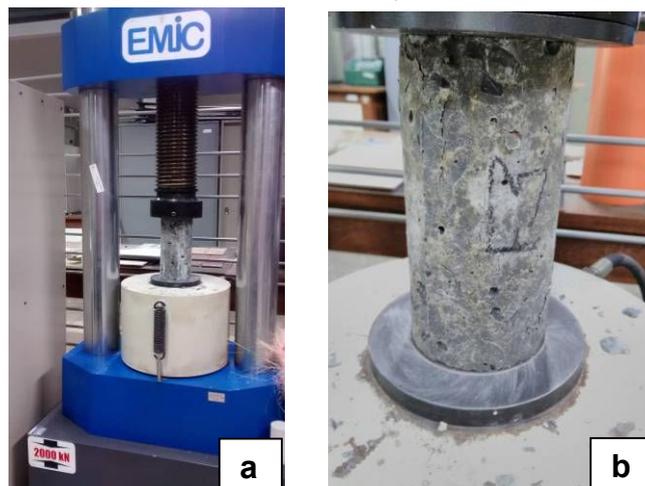
$\sigma_c$ : tensão de compressão na ruptura (MPa);

P : carga de ruptura lida na prensa (N);

D : diâmetro do corpo de prova (mm);

Foram moldados 15 (quinze) corpos de prova cilíndricos (200 mm de altura x 100 mm de diâmetro), por traço, divididos em: 03 (três) exemplares com a idade de ruptura de 7dias e 12 (doze) exemplares rompidos aos 28 dias, tomando-se como resistência final a média aritmética entre eles.

Figura 29-Ensaio de Compressão dos CP's

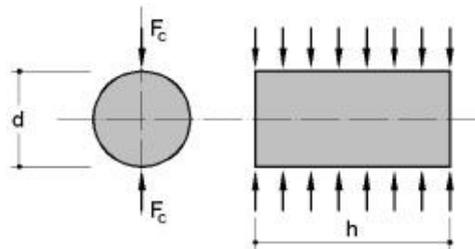


Fonte: autor, 2016

### 3.2.10 Resistência à tração por compressão diametral

Este ensaio seguiu as recomendações da NBR 7222 (2011). A carga é aplicada ao longo das duas geratrizes diametralmente opostas do corpo-de-prova, como visto na Figura 30. 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).

Figura 30-cargas atuantes - Ensaio de resistência a tração por compressão diametral



Fonte: autor, 2016

Este tipo de ensaio correlaciona a tensão de ruptura à compressão diametral com a tensão de ruptura à tração usando a seguinte equação:

$$\sigma_T = \frac{2 \cdot P}{\pi \cdot D \cdot L} = \frac{63,7 \cdot P}{9,8 \cdot 19,6}$$

Sendo:

$\sigma_T$ : tensão de tração na ruptura (MPa);

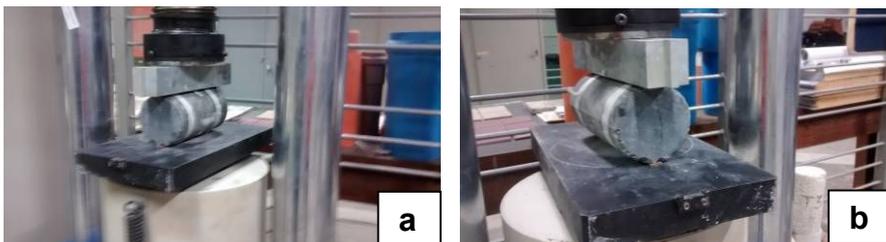
P : carga de ruptura (tf);

D : diâmetro do corpo de prova (cm);

L: comprimento do corpo de prova (cm);

O corpo-de-prova é colocado com o eixo horizontal entre os pratos da prensa e posicionado com o uso de ripas de madeira (Figura 31).

Figura 31-CP recebendo cargas atuantes (a) e CP rompido(b)



Fonte: autor, 2016

Foram moldados 3 (três) corpos-de-prova (200 mm de altura x 100 mm de diâmetro) com diferentes percentuais de CBC (Figura 32), com ruptura aos 28 dias, tomando-se como resistência final a média aritmética.

Figura 32-CP's rompidos com 0%(a), 20%(b) e 40%(c)



Fonte: autor, 2016

### 3.2.11 Módulo de Elasticidade Dinâmico

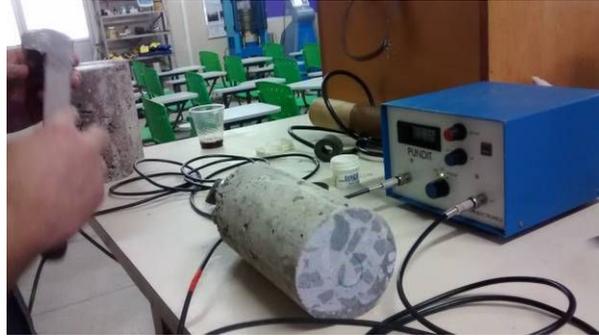
Após o levantamento e preparação dos corpos-de-prova, realizou-se o ensaio para determinação do módulo de elasticidade dinâmico (MED), baseando-se na ASTM C597 (2016). O ensaio para determinação da velocidade de propagação da onda ultra-sônica foi realizado com o equipamento PUNDIT (aparelho de ultra-som portátil digital), que possui frequência de 54 kHz, em todos os corpos-de-prova, tanto para a condição de umidade saturada quanto para a seca. Como todos os corpos-de-prova estavam armazenados na câmara úmida do laboratório de materiais, primeiramente se executou o ensaio com os mesmos saturados.

Os corpos-de-prova foram retirados de dentro da câmara úmida e armazenados dentro de um recipiente com água para proceder a limpeza do material e, também, para garantir que os mesmos não perdessem umidade durante o transporte até uma sala climatizada para realização do ensaio na condição saturada, onde a temperatura foi mantida em  $(22\pm 2)^{\circ}\text{C}$ .

Os corpos-de-prova foram retirados da água e colocados verticalmente sobre panos úmidos por 2 minutos para que escoasse o excesso de água da superfície. Posteriormente, aplicou-se uma camada de vaselina nas superfícies planas do emissor e do receptor do equipamento, permitindo o acoplamento dos mesmos no corpo-de-prova. Registrou-se, então, a velocidade de propagação da onda, em  $\mu\text{s}$ , em cada corpo-de-prova. O ensaio foi realizado com o equipamento posicionado no

modo de transmissão direta, conforme pode ser observado na Figura 33, e o mesmo foi calibrado a cada 3 exemplares ensaiados.

Figura 33- Ensaio de ultrassom para determinar a velocidade de propagação da onda ultrassônica



Fonte: autor, 2016

Para calcular o módulo de elasticidade dinâmico, conforme a ASTM C597 (2016), é a densidade do corpo de prova. Para se obter esta informação, calculou-se o volume do corpo-de-prova e o peso seco do mesmo. Outro dado que compõe a equação para se determinar o MED é o coeficiente de Poisson. Em função da impossibilidade de se obter este valor experimentalmente, esta informação foi estabelecida com base na literatura, buscou-se trabalhos que possuíssem concretos com o mesmo tipo de resíduo.

Com base nos estudos de Ajdukiewiewicz e Kliszczewicz (2002) adotou-se o valor de 0,20. De posse dessas informações, foi possível calcular o módulo de elasticidade dinâmico, por meio da Equação:

$$E_d = \rho V^2 \frac{(1+\mu)(1-2\mu)}{(1-\mu)}$$

Onde:

$E_d$  = módulo de elasticidade dinâmico (MPa);

$\rho$  = massa específica (kg/m<sup>3</sup>);

$V$  = velocidade (km/s);

$\mu$  = coeficiente de Poisson.

A Tabela 11 mostra os resultados encontrados de no ensaio de ultrassom aos 28 dias:

Tabela 11- Valores do ensaio de ultrassom

Traços	Tempos ( $\mu$ s)		
	Amostra A	Amostra B	Amostra C
01 (CBC 0%)	38,2	39,2	37,6
02 (CBC 20%)	39,9	39,2	39,8
03 (CBC 40%)	43,1	43,4	44,1

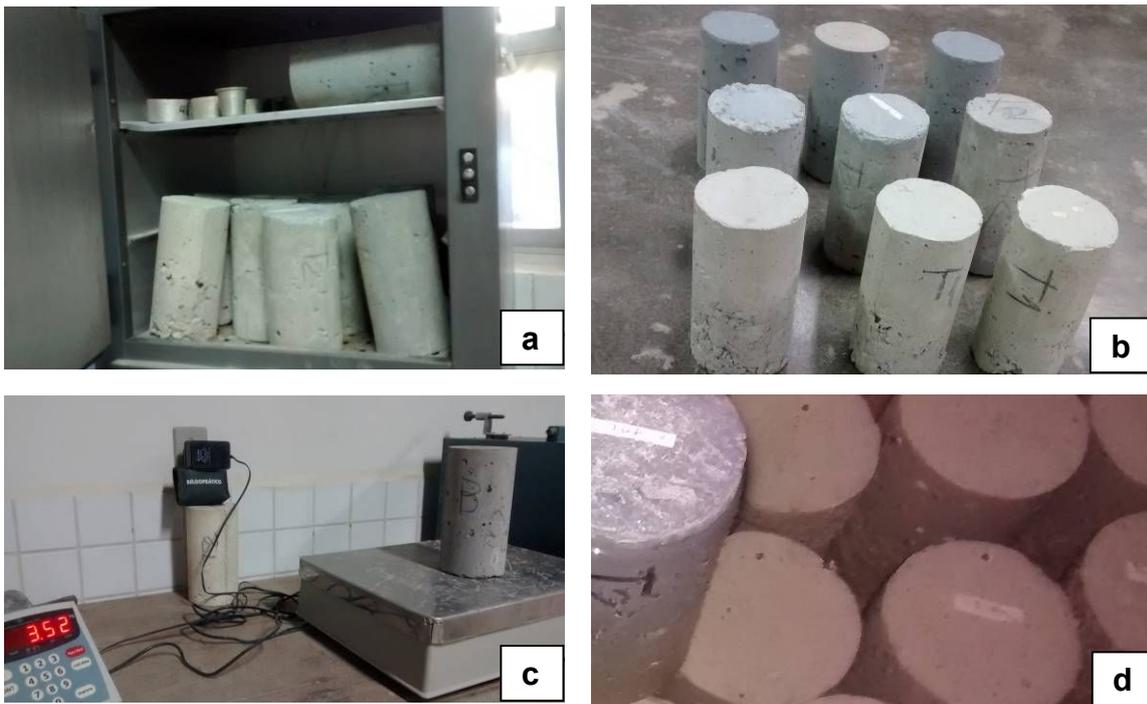
Fonte: autor, 2016

### 3.2.12 Absorção total

O ensaio para determinar a absorção foi efetuado através da NBR 9778 (2005) em 3 corpos-de-prova cilíndricos (200 mm de altura x 100 mm de diâmetro), por traço, cuja moldagem seguiu a NBR 5738 (2015). Os corpos-de-prova permaneceram em cura até a idade de 28 dias quando foram inseridos em estufa para a secagem até a constância da massa. Posteriormente, foram retirados da estufa e mantidos ao ar livre para resfriamento, com o intuito de evitar taxas iniciais elevadas de absorção de água. Antes de iniciar a imersão, os corpos-de-prova foram pesados, determinando-se a massa inicial.

A Figura 34 mostra os CP's no processo para determinação de sua absorção.

Figura 34-CP na estufa(a) e separados por traço(b), pesagem(c) e imersão(d)



Fonte: autor, 2016

## 4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

---

Os resultados obtidos com os métodos descritos no capítulo anterior e suas respectivas análises são relatados a seguir. Esses dados são apresentados em dois grandes grupos. O primeiro se refere à caracterização das matérias primas. O segundo à caracterização dos concretos fabricados.

Analisaram-se os resultados de cada ensaio isoladamente, comumente sem relacioná-los, com o objetivo de detectar apenas a influência do teor de substituição em cada propriedade medida.

A caracterização mecânica se dará através de ensaios de resistência a compressão axial e tração por compressão diametral, além de avaliar a durabilidade em função da capacidade de absorção de água.

São apresentados os valores de resistência à compressão dos concretos após 28 dias de fabricação, respectivamente, em função do tipo de agregado miúdo utilizado.

- Concreto com 100% agregado miúdo proveniente de areia Normal;
- Concreto com 20% agregado miúdo proveniente de CBC e 80% de areia Normal;
- Concreto com 40% agregado miúdo proveniente de CBC e 60% de areia Normal.

A resistência de concretos de baixas resistências confeccionados com agregados naturais é função basicamente da porosidade da pasta e da zona de transição, sendo que a resistência do agregado natural não afeta o comportamento mecânico do compósito. (MEHTA e MONTEIRO, 2005).

Se considerarmos a porosidade dos agregados de concreto e conseqüentemente sua maior absorção de água é de se esperar que os concretos com agregados britados apresentem uma relação *a/c* efetiva menor e maior resistência.

### 4.1 Moagem e índice de finura da CBC

Em BESSA (2012), as amostras utilizadas nas análises de caracterização e moldagem dos concretos foram obtidas a partir da CBC seca em estufa a 100 °C, por 12 h, e posteriormente moídas por 3 min, na rotação de 65 rpm. Esse tempo de

moagem foi escolhido em função do menor gasto de energia para se obter a uniformização das amostras de CBC.

Deste modo, os processos de secagem e moagem realizados neste estudo, mostraram-se adequados, proporcionando a redução do tamanho dos grãos de cinza e melhor uniformidade do material.

#### 4.2 Teor de Umidade da CBC

O resultado do ensaio de teor de umidade da cinza do bagaço da cana-de-açúcar é apresentado na Tabela 12.

Tabela 12-Teor de Umidade

Amostra	Peso úmido (23/01/17)	Peso Seco (27/01/17)	Umidade
01(Recipiente 01)	2,50 kg	1,70 kg	50%
02(Recipiente 02)	0,54 kg	0,26 kg	77,78%
03(Recipiente 01)	3,30 kg	2,00 kg	54,17%
04(Recipiente 02)	0,58 kg	0,28 kg	75%
05(Recipiente 01)	3,22 kg	2,60 kg	26,72%
06(Recipiente 02)	0,56 kg	0,30 kg	68,42%
<b>Umidade Média</b>			<b>58,68%</b>

Fonte: autor, 2016

Onde:

Recipiente 01=0,9kg

Recipiente 02= 0,18kg

Peso Úmido=Recipiente + material

Peso Seco=Recipiente + material

O teor de umidade da cinza in natura, por ser elevado, poderia modificar a relação água/cimento do concreto. Sendo assim, este ensaio foi realizado para que através dos resultados pudesse ser determinada a temperatura e o tempo de secagem da cinza.

#### 4.3 Distribuição granulométrica

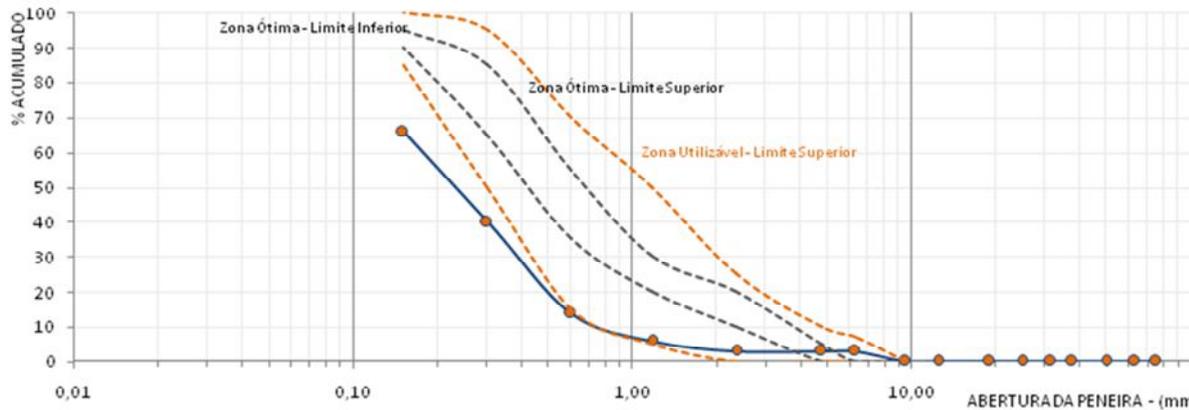
A Tabela 13 e a Figura 35 apresentam a análise granulométrica da CBC, segundo o método proposto pela NM 248 (2003).

Tabela 13-Granulometria do CBC

<b>Dim. Máx. Característica</b>	<b>4,75</b>
<b>Módulo de Finura</b>	<b>1,32</b>

Fonte: autor, 2016

Figura 35- Curva granulométrica da CBC



Fonte: autor, 2016

Como pode ser visto, a dimensão média encontrada para as partículas de CBC residual foi inferior a 0,600 mm e sabendo que 48,81% da cinza passa na peneira de 0,475 mm, pode-se afirmar que sua granulometria é próxima à da areia fina.

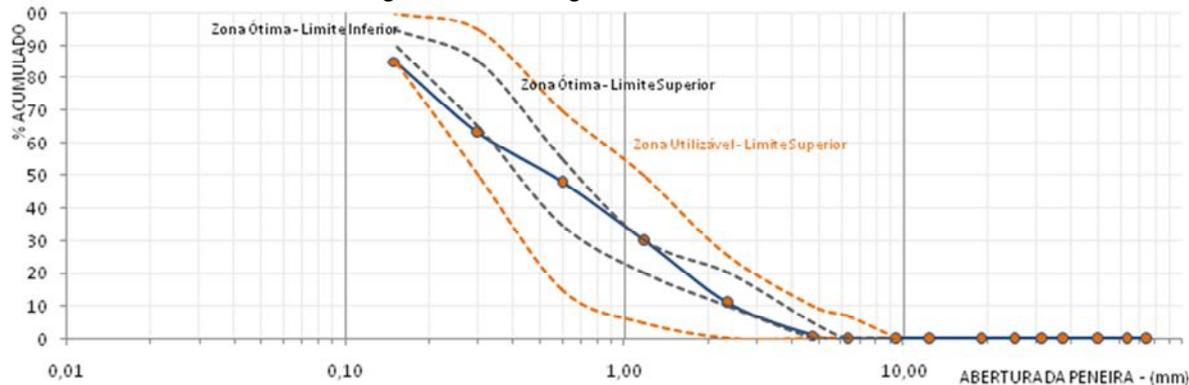
A Tabela 14 e a Figura 36 apresentam a análise granulométrica da areia, segundo o método proposto pela NM 248 (2003).

Tabela 14-Granulometria da areia

<b>Dim. Máx. Característica</b>	<b>4,75</b>
<b>Módulo de Finura</b>	<b>2,40</b>
<b>Massa Unitária(g/cm<sup>3</sup>)</b>	<b>1,55</b>

Fonte: autor, 2016

Figura 36- Curva granulométrica da Areia



Fonte: autor, 2016

A caracterização do agregado apresentou massa unitária no estado seco e solto (NM 45/2006) no valor de  $51 \text{ kg/m}^3$  e absorção de água (NM 30/2001) no valor de 5,55 %. A areia atendeu aos requisitos da NBR 7211(2009) e pode ser classificada como areia fina.

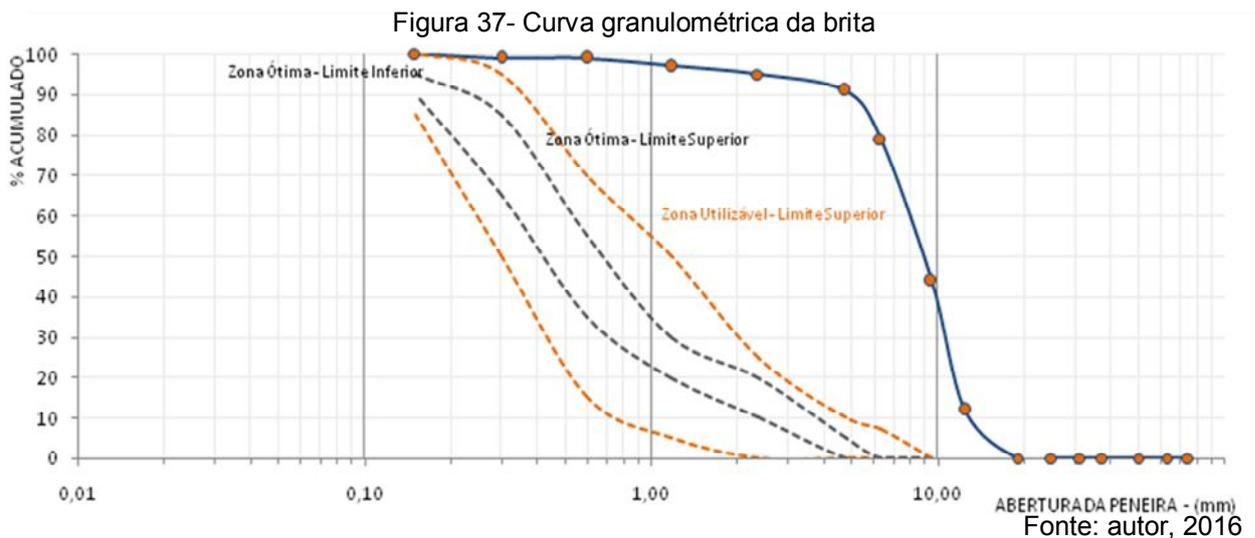
A brita basáltica foi utilizada como agregado graúdo nesta pesquisa.

A análise granulométrica do agregado graúdo encontra-se na Tabela 15 e na Figura 37.

Tabela 15-Granulometria da brita

<b>Dim. Máx. Característica</b>	<b>19</b>
<b>Módulo de Finura</b>	<b>6,27</b>
<b>Massa Unitária (<math>\text{g/cm}^3</math>)</b>	<b>1,45</b>

Fonte: autor, 2016



Essa brita, no entanto, se enquadrou nos limites granulométricos apresentados pela NBR 7211(2009) e pode ser classificada na graduação da Brita 1.

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

No trabalho de Souto et al. (2009), o valor encontrado para a dimensão máxima característica (DMC) da CBC ficou em 0,60 mm, o mesmo encontrado para as amostras utilizadas na pesquisa.

#### 4.4 Difração de raios-X

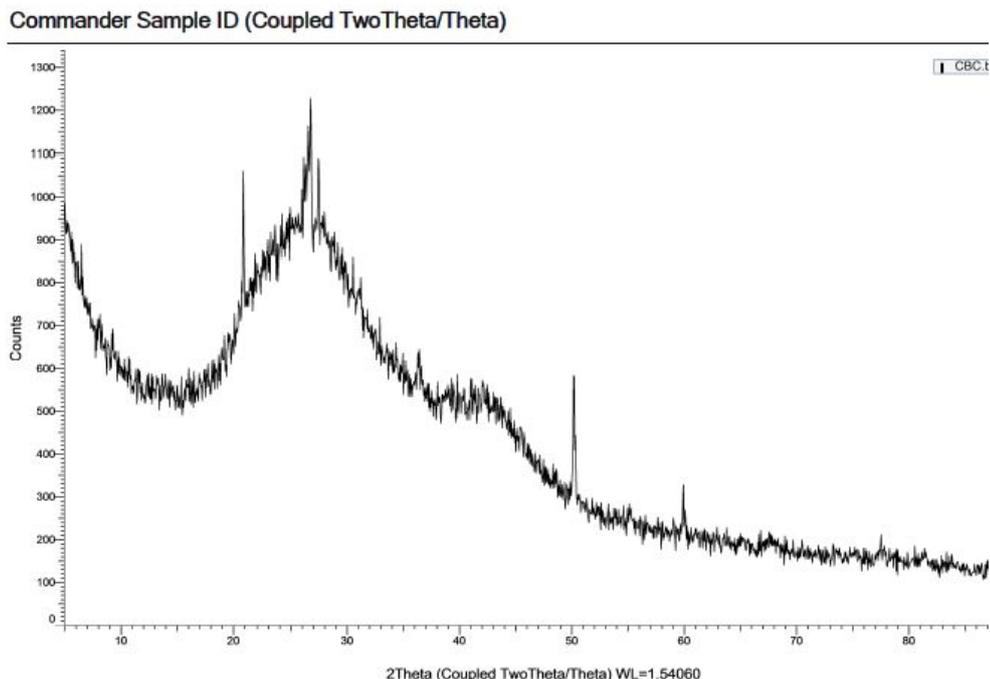
Os resultados obtidos no ensaio de difração de raio x apresentam as características químicas da cinza do bagaço da cana-de-açúcar analisada e não se enquadram na Classe E, NBR 12653 (2015). Confirmando a baixa reatividade do material e considerando-o como não pozolânico devido à predominância de fases cristalinas encontradas.

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

Quanto menor a incidência de picos bem definidos no gráfico resultante do ensaio maior é o grau de vitrificação do produto, ou seja, terá uma maior quantidade de material amorfo e menor cristalinidade.

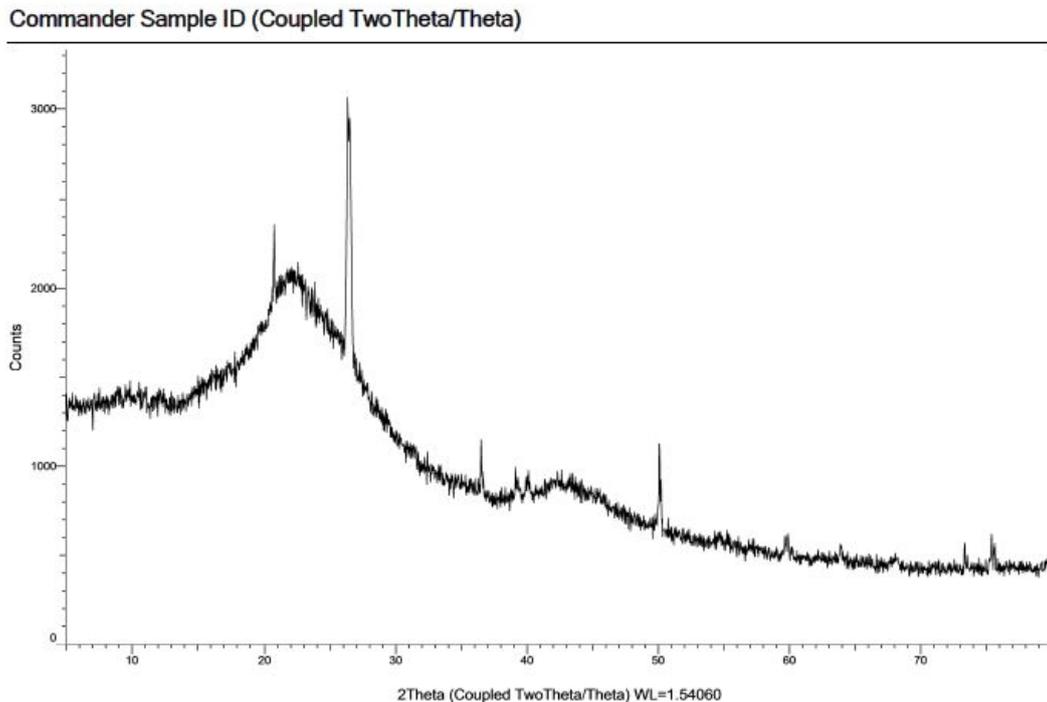
As Figuras 38 e 39 correspondem aos difratogramas da CBC empregadas neste trabalho, exibe picos intensos de alfa óxido de silício e quartzo alfa, o que evidencia a existência de suas fases cristalinas. No entanto, é possível notar um pequeno desvio na linha de base no ângulo ( $2\theta$ )  $20^\circ$ , que sugere indícios de uma pequena quantidade de fase amorfa.

Figura 38-Difratograma da CBC da primeira amostra usada neste trabalho



Fonte: autor, 2016.

Figura 39-Difratograma da segunda amostra da CBC usada neste trabalho



Fonte: autor, 2016.

Através deste ensaio, pode-se afirmar que partículas de solo aderiram à cinza e se mantiveram até após a queima. Frías et al. (2006) também encontraram desvio na linha base de uma estrutura amorfa e picos de quartzo, calcita e cristobalita, enquanto Guzmán et al. (2011) determinou que sua cinza tem comportamento amorfo. Utilizando cinza do bagaço de cana-de-açúcar, Cordeiro et al. (2008) encontraram picos de quartzo e cristobalita na mineralogia da cinza estudada.

#### 4.5 Resistência à compressão

Os concretos desenvolvidos apresentaram trabalhabilidade e coesão adequada para a moldagem dos corpos de prova. A ocorrência de exsudação ou segregação dos materiais não foi observada. Os ensaios para determinar as propriedades dos concretos no estado fresco foram realizados logo após a produção do concreto em betoneira, para evitar a perda de trabalhabilidade e o comprometimento dos resultados dos ensaios.

Este ensaio foi realizado pela média aritmética dos valores de resistência à compressão de 03 (três) corpos-de-prova aos 07 (sete) dias e 12 (doze) aos 28 dias, excluindo-se os valores que ultrapassam o desvio relativo máximo de 6%, definido

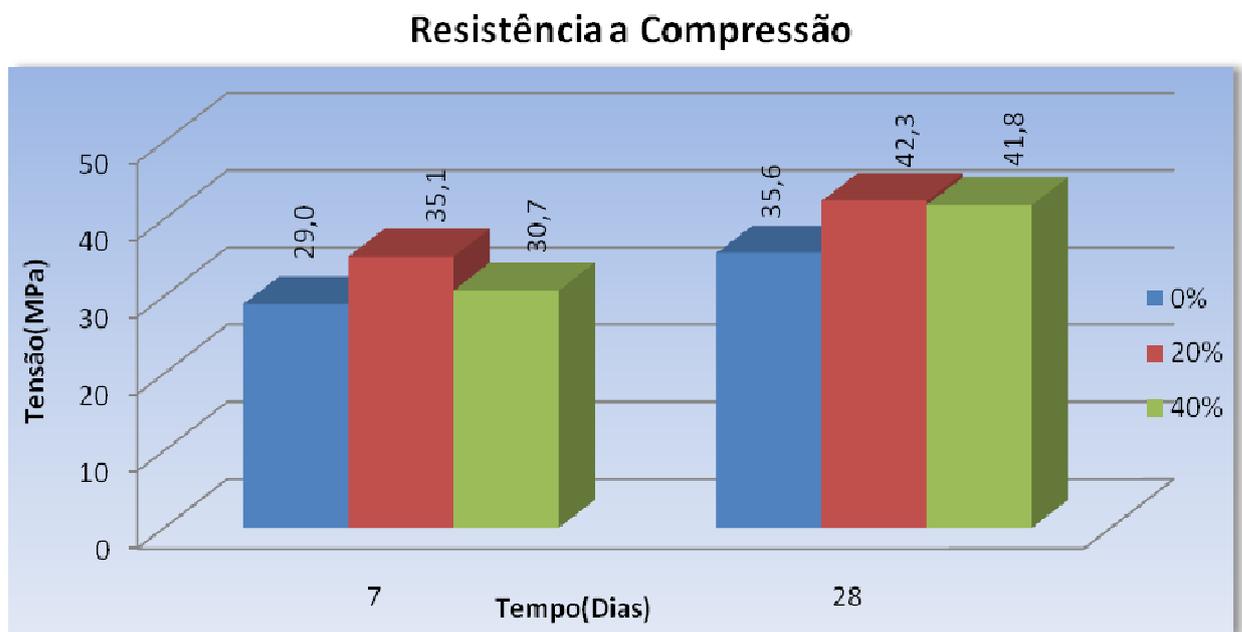
pela NBR 5739 (2007) e os resultados obtidos na pesquisa estão apresentados na Tabela 16.

Tabela 16-Resistência a compressão do concreto aos 07 e aos 28 dias

<b>Resistência a Compressão (07dias)</b>			
<b>Traço</b>	<b>Amostra</b>	<b>Tensão (MPa)</b>	<b>Média (MPa)</b>
FAMÍLIA 01 (0% de CBC)	01	32,1	29,0
	02	25,0	
	03	29,8	
FAMÍLIA 02 (20% de CBC)	01	36,3	35,1
	02	32,0	
	03	37,1	
FAMÍLIA 03 (40% de CBC)	01	31,9	30,7
	02	31,1	
	03	29,2	
<b>Resistência a Compressão (28dias)</b>			
<b>Traço</b>	<b>Amostra</b>	<b>Tensão (MPa)</b>	<b>Média (MPa)</b>
FAMÍLIA 01 (0% de CBC)	01	33,3	35,6
	02	33,3	
	03	27,0	
	04	37,9	
	05	31,4	
	06	41,9	
	07	37,4	
	08	44,5	
	09	39,9	
	10	36,6	
	11	32,6	
	12	30,8	
FAMÍLIA 02 (20% de CBC)	01	46,6	42,3
	02	39,8	
	03	44,6	
	04	41,5	
	05	35,7	
	06	40,7	
	07	47,2	
	08	46,7	
	09	38,3	
	10	45,9	
	11	39,7	
	12	41,4	
FAMÍLIA 03 (40% de CBC)	01	42,2	41,8
	02	42,7	
	03	42,3	
	04	40,9	
	05	41,7	
	06	43,4	
	07	42,4	
	08	42,2	
	09	42,2	
	10	41,4	
	11	40,1	
	12	40,4	

O gráfico da Figura 40 apresenta as resistências dos traços de 0%, 20% e 40%, nas idades analisadas e, com os resultados obtidos, observa-se que ocorrem aumento nos valores da resistência nas amostras, conforme diminui a fração de CBC no concreto. O traço de referência apresenta os piores resultados, com valores de 28,97 e 35,55 MPa, nas idades de 7 e 28, respectivamente.

Figura 40-Resultado do ensaio de resistência a compressão.



Fonte: autor, 2016

Diante do exposto, podemos dizer que no estudo com substituição parcial do agregado miúdo por CBC o traço com 20% de substituição ao agregado miúdo apresentou o melhor resultado, onde atingiu, aos 28 dias, uma resistência cerca de 16% superior ao de referência, além disso, o traço com adição de 40% de CBC, apesar de ter um ganho na resistência, nota-se que ocorre um decréscimo dos valores de resistência à compressão axial, indicando que o aumento na quantidade de agregado miúdo a ser substituído, não aumenta a resistência, devido ao material ser pulverulento e não possuir superfície específica satisfatória.

#### 4.6 Resistência à tração compressão diametral

Este ensaio é realizado pela média aritmética dos valores de resistência à tração dos três corpos-de-prova, de acordo com a NBR 7222 (2011).

Os valores da resistência à tração por compressão diametral no estudo de substituição parcial de cimento pelo CBC estão mostrados na Tabela 17. Observa-se que com 20% de CBC também ocorre um aumento na resistência a tração por compressão diametral, aos 28 dias.

Da mesma forma que os resultados da compressão axial apresentam um decréscimo dos valores, também é percebido este fato no ensaio de resistência a tração, indicando que o aumento na quantidade de agregado miúdo a ser substituído, não aumenta a resistência, devido ao material ser pulverulento e não possuir superfície específica satisfatória.

Tabela 17-Resistência a tração por compressão diametral do concreto aos 28 dias

Resistência a tração				
Traço	Amostra	Força Máx.(kgf)	Tensão (MPa)	Média
FAMÍLIA 01 (0% de CBC)	01	14172	4,5	4,2
	02	14687	4,7	
	03	11152	3,5	
FAMÍLIA 02 (20% de CBC)	01	14910	4,7	4,5
	02	12967	4,1	
	03	14152	4,5	
FAMÍLIA 03 (40% de CBC)	01	11450	3,6	3,9
	02	13780	4,4	
	03	11640	3,7	

Fonte: autor, 2016

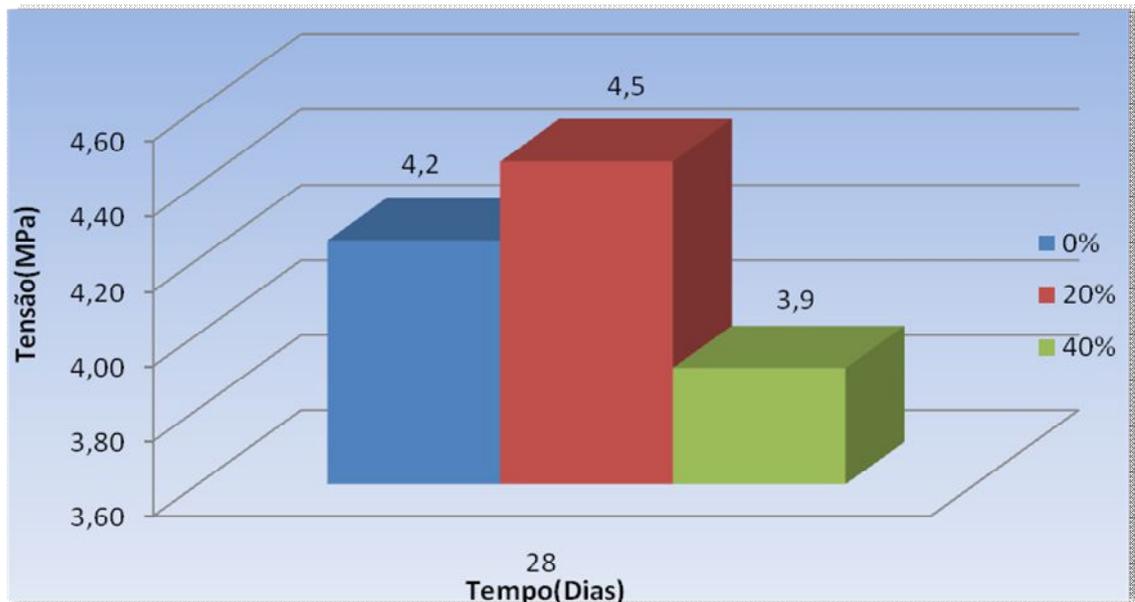
Segundo Mehta e Monteiro (1994), a resistência à tração depende do nível geral de resistência à compressão e quanto maior for a resistência à compressão, menor será a relação entre estas duas propriedades. Sendo assim, a relação entre a resistência à tração e a resistência à compressão é de 10-11 % para o concreto de baixa resistência, 8-9% para o concreto de média resistência é de 7 % para o concreto de alta resistência.

De acordo com a Figura 41, ocorreu um aumento em cerca de 4 % de resistência à tração por compressão diametral no traço 20 % em relação ao traço de referência

aos 28 dias. No entanto, o traço com 40 % de CBC, a resistência diminuiu bruscamente.

Figura 41-Resultado do ensaio de resistência a tração por compressão diametral.

### Resistência a Tração por Compressão Diametral



Fonte: autor, 2016

O ensaio de resistência à tração por compressão diametral é uma técnica que complementa o ensaio de compressão axial, pois apesar de ser um ensaio de compressão, o material sofre esforços de tração.

#### 4.7 Módulo de elasticidade

Para determinação do módulo de elasticidade dinâmico, calculou-se a densidade dos 03 (três) corpos de prova de cada traço e que estavam armazenados na câmara úmida aos 28 dias. Outro dado que compõe a equação para se determinar o MED é o coeficiente de Poisson. A NBR 6118 (2014) admite para o concreto um coeficiente de Poisson relativo às deformações elásticas iguais a 0,2, valor utilizado nesse trabalho.

A Tabela 18 mostra os resultados encontrados de módulo de elasticidade aos 28 dias:

Tabela 18-Módulo de elasticidade dinâmico aos 28 dias

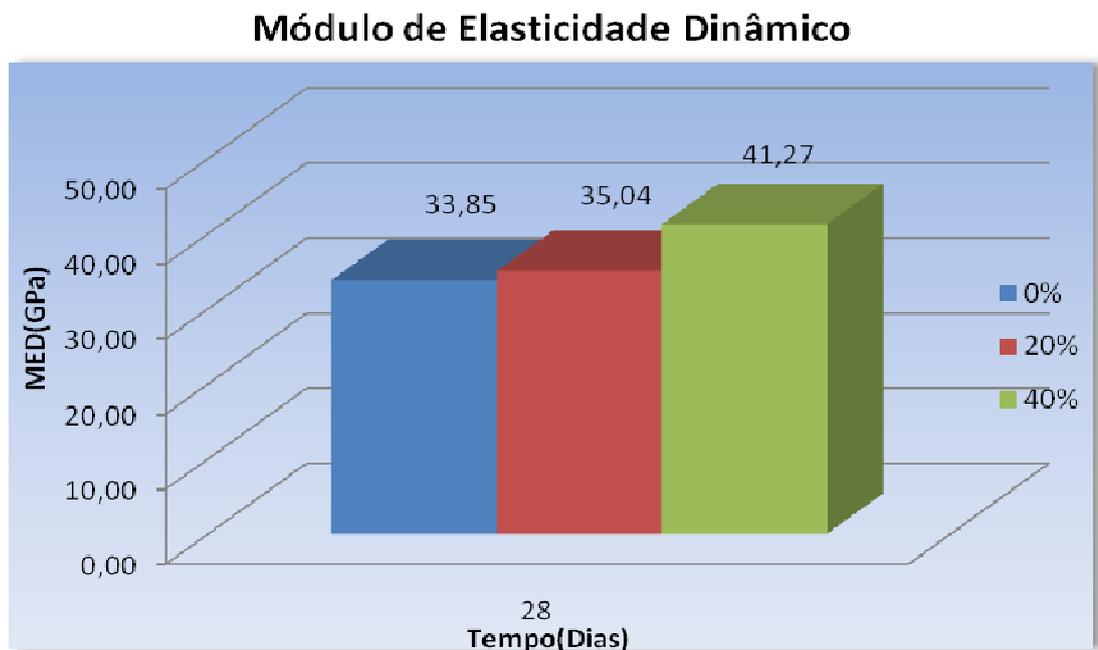
<b>Módulo de Elasticidade</b>					
<b>Traço</b>	<b>Velocidade (km/s)</b>	<b>Peso (kg)</b>	<b>Volume (m³)</b>	<b>Massa Específica (kg/m³)</b>	<b>Módulo de Elasticidade Dinâmico(GPa)</b>
FAMÍLIA 01 (0% de CBC)	38,33	3,76	1,47	2,56	33,85
FAMÍLIA 02 (20% de CBC)	39,63	3,72	1,50	2,48	35,04
FAMÍLIA 03 (40% de CBC)	43,53	3,73	1,54	2,42	41,27

Fonte: autor, 2016

Analisando a Figura 42, percebe-se, de modo geral, que com a incorporação da CBC, ocorreu um aumento dos valores do módulo de elasticidade e um incremento na deformabilidade dos corpos-de-prova pois, de acordo com a Lei de Hook, materiais com baixo módulo deformam muito elasticamente quando sujeitos às solicitações mecânicas.

Recomenda-se até 40% de incorporação de CBC, pois o aumento do módulo de elasticidade em relação ao traço controle é de 17 %, abaixo deste percentual de teor de CBC a redução é significativamente maior.

Figura 42-Resultado do ensaio de Módulo de Elasticidade Dinâmico



Fonte: autor, 2016

#### 4.8 Absorção Total

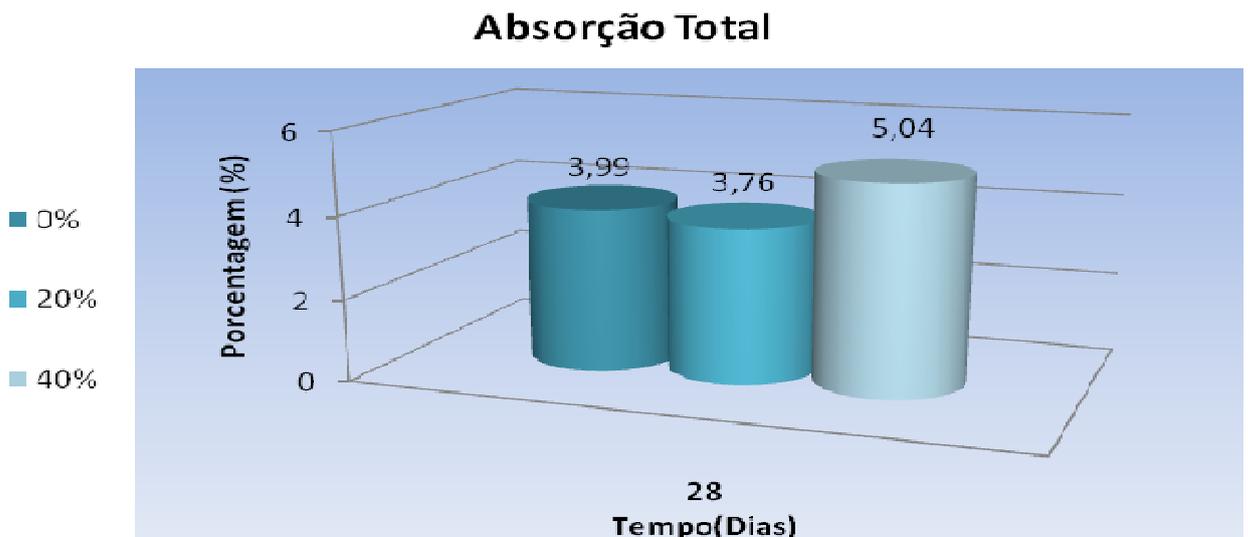
O ensaio de absorção dos concretos foi realizado, segundo as recomendações da norma NBR 9778 (2005), nos concretos com idade de 28 dias. Os resultados dos ensaios de absorção de total na amostra referência e nas amostras com adição de CBC são apresentados na Tabela 19 e na Figura 43.

Tabela 19-Resultados do Ensaio de Absorção total aos 28 dias.

Absorção Total					
Traço	Amostra	Peso Seco (KG)	Peso Úmido (KG)	Absorção (%)	Absorção Média(%)
FAMÍLIA 01 (0% de CBC)	01	3,48	3,63	4,31	3,99
	02	3,51	3,64	3,70	
	03	3,54	3,68	3,95	
FAMÍLIA 02 (20% de CBC)	01	3,62	3,77	4,14	3,76
	02	3,52	3,63	3,13	
	03	3,75	3,90	4,00	
FAMÍLIA 03 (40% de CBC)	01	3,62	3,80	4,97	5,04
	02	3,52	3,74	6,25	
	03	3,60	3,74	3,89	

Fonte: autor, 2016

Figura 43-Gráfico da absorção total aos 28 dias.



Fonte: autor, 2016

Verificou-se a redução da absorção ao adicionar 20 % e 40 % dos teores de CBC. A adição de finos no concreto está diretamente associada ao efeito físico, uma vez que

promoveu o preenchimento dos vazios presentes na pasta, e, com isto, dificultou da movimentação de água através dos capilares.

Observa-se que os traços com adição de 0 % CBC absorve mais umidade que todos os outros. Os ensaios realizados em 72 h apresentam variações expressivas nos valores de absorção de umidade. O traço com 20 % de CBC foi o que menos absorveu água, com um valor percentual de absorção de aproximadamente 3,76%. Este traço além de apresentar uma absorção menor que o traço referência, também foi o que apresentou a melhor resistência axial.

Também pode ser verificado que os concretos com maior quantidade de CBC em substituição do agregado miúdo absorvem mais umidade. Levando a observação que, o comportamento das amostras é crescente, ou seja, quanto maior é a quantidade de CBC no concreto, maior é a absorção de umidade.

De acordo com 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, ocasionando um aumento na demanda de água (MACEDO et al., 2009).

## 5. CONCLUSÕES

---

O processo de moagem da cinza do bagaço da cana-de-açúcar mostrou-se importante, tendo em 20 minutos o tempo ideal de moagem por propiciar homogeneidade no tamanho dos grãos e sua redução, confirmada pela superfície específica e granulometria.

Os ensaios de resistência a compressão axial e de tração por compressão diametral mostraram que os concretos sofreram redução de resistência ao adicionar o CBC. Entretanto, o traço com adição de 20 % foi o que apresentou um resultado aceitável com relação à resistência à compressão axial, atingindo uma resistência de 42,3 MPa, aos 28 dias, aproximadamente 16% maior que o traço referência.

Quanto às alterações no módulo de elasticidade dinâmico em função do uso de diferentes teores (0, 20 e 40 %) de CBC, é possível afirmar que diferentes percentuais influenciam o módulo de elasticidade e que, quanto maior o teor de substituição, maior o módulo de elasticidade.

No difratograma das amostras de CBC notam-se picos de estrutura cristalina, indicando um desvio da linha de base no ângulo ( $2\theta$ )  $20^\circ$  que sugere a existência de uma pequena parcela de material amorfo.

A adição dos finos de CBC para todos os teores de substituição propiciou o aumento da absorção de água, devido ao preenchimento dos vazios, dificultando o ingresso de agentes agressivos ao concreto.

No estudo por substituição de agregado miúdo por CBC, a utilização da cinza do bagaço da cana-de-açúcar se tornou uma alternativa interessante de agregado, pois é um material que apresenta resistência satisfatória, tendo a possibilidade de ser utilizado como uma matéria-prima renovável.

## 6. SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

---

Este trabalho apresentou os resultados da aplicação da cinza do bagaço da cana-de-açúcar (CBC) em concretos, segundo os aspectos mecânicos da aplicação desse resíduo como substituto do agregado miúdo. Por isso, no desenvolvimento dos concretos e argamassas não foram utilizados aditivos complementares, para que os resultados obtidos não ficassem vinculados ao uso destes materiais.

Seria importante a realização de um estudo aprofundado sobre a durabilidade desses concretos, verificando o seu comportamento frente aos agentes agressivos ao longo do tempo. Além de avaliar outras características do concreto com a cinza do bagaço da cana-de-açúcar incorporada com a realização de ensaios eletroquímicos.

Determinar a relação entre o valor do módulo de elasticidade dinâmico e o valor do módulo de elasticidade estático em concretos confeccionados com diferentes percentuais de substituição do agregado miúdo por CBC.

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

## REFERÊNCIAS

---

AJDUKIEWIEWICZ, A.; KLISZCZEWICZ, A. Influence of recycled aggregates on mechanical properties of HS/HPC. *Cement & Concrete Composites*, 2002, v.24.p 269-279.

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

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. ASTM C597:2016 Standard Test Method for Pulse Velocity Through Concrete. Philadelphia 2016.

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

ANEPAC, Construindo o presente. Criando o futuro, Disponível em: <http://anepac.org.br/wp/agregados/brita>. Acesso em: 18 de abril de 2015.

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

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT. NBR NM 23: cimento portland e outros materiais em pó – determinação de massa específica. Rio de Janeiro, 2001.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - ABNT. NBR NM 30: agregado miúdo – determinação da absorção de água. Rio de Janeiro, 2001.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - ABNT. NBR NM 45: agregados – determinação da massa unitária e do volume de vazios. Rio de Janeiro, 2006.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - ABNT. *NBR 16372*: cimento portland – determinação da finura pelo método de permeabilidade ao ar (Método de Blaine). Rio de Janeiro, 2015.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - ABNT. *NBR NM 248*: agregados – determinação da composição granulométrica. Rio de Janeiro, 2003.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - ABNT. NBR 6118 - Projeto de estruturas de concreto - Procedimento. Rio de Janeiro, 2014.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - ABNT. *NBR 7211*: Agregados para concretos. Rio de Janeiro, 2009.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - ABNT. *NBR 7222*: argamassa e concreto – determinação da resistência à compressão diametral de corpos-de-prova cilíndrico. Rio de Janeiro, 2011.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - ABNT. NBR 9935: Agregados – Terminologia. Rio de Janeiro, 2011.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - ABNT. NBR 9778: argamassa e concreto – Determinação da absorção de água, índice de vazios e massa específica. Rio de Janeiro, 2005.

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

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - ABNT. NBR 12653: materiais pozolânicos. Rio de Janeiro, 2015.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - ABNT. NBR 12821: Preparação de concreto em laboratório – Procedimento. Rio de Janeiro, 2009.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - ABNT. *NBR 12826*: cimento portland e outros materiais em pó – determinação do índice de finura por meio de peneirador aerodinâmico. Rio de Janeiro, 2014.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - ABNT. NBR 5738. Concreto - Procedimento para moldagem e cura de corpos de prova. Rio de Janeiro, 2015.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - ABNT. NBR 5739. Concreto - Ensaio de compressão de corpos-de-prova cilíndricos. Rio de Janeiro, 2007.

BESSA, SOFIA ARAÚJO LIMA. Utilização da cinza do bagaço da cana-de-açúcar como agregado miúdo em concretos para artefatos de infraestrutura urbana / Sofia Araújo Lima Bessa. -- Tese (Doutorado) -- Universidade Federal de São Carlos, 2011. São Carlos : UFSCar, 2012. 182 f.

BORLINI, M. C.; MENDONÇA, J. L. C. C.; VIEIRA, C. M. F.; MONTEIRO, S. N. Influência da temperatura de sinterização nas propriedades físicas, mecânicas e microestruturais de cerâmica vermelha incorporada com cinza de bagaço de cana-de-açúcar. *Revista Matéria*, Rio de Janeiro, v.11, n. 4, p. 435-443, 2006.

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

CESNIK, R. Melhoramento da cana-de-açúcar: marco sucro-alcooleiro no Brasil. Disponível em: [http://www.cnpma.embrapa.br/down\\_hp/344.pdf](http://www.cnpma.embrapa.br/down_hp/344.pdf). Acesso em: 05 ago. 2008.

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

COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO - CONAB. Acompanhamento de Safra Brasileira: Cana-de-açúcar, Primeiro Levantamento, Maio/2011 – Companhia Nacional de Abastecimento. – Brasília: CONAB 2011.

COOK, D. J. “Rice husk ash”. In: Swamy, R. N. (ed), Concrete technology and design – v. 3 Cement Replacement materials, London: Blackie and Son Ltd., 1986.

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

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

CORDEIRO, G. C.; TOLEDO FILHO, R. D.; TAVARES, L. M.; FAIRBAIRN, E. M. R. Ultrafine grinding of sugar cane bagasse ash for application as pozzolanic admixture in concrete. Cement and Concrete Research, Kidlington, v. 39, p. 110-115, 2008.

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

DEPARTAMENTO NACIONAL DE PRODUÇÃO MINERAL - DNPM. Anuário Mineral Brasileiro - 2006 (Brazilian Mineral Yearbook 2006). Departamento Nacional de Produção Mineral – DNPM (org.). Brasília, v. 34, ISSN 01009303.

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

EMBRAPA Agropecuária. Experimentos em cana-de-açúcar. Disponível em: <<http://www.agencia.cnptia.embrapa.br/gestor/cana-de-acucar/Abertura.html>>.

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

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

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

- FRÍAS, M.; VILLAR-COCIÑA, E.; VALENCIA-MORAES, E. Characterization of sugar cane straw waste as pozzolanic material for construction: Calcining temperature and kinetic parameters. *Waste Management*, Kidlington, v. 27, p. 533-538, 2006.
- GANESAN, K.; RAJAGOPAL, K.; THANGAVEL, K. Evaluation of bagasse ash as supplementary cementitious material. *Cement & Concrete Composites*, no. 29, p. 515–524. 2007.
- GAVA, G. P. Estudo comparativo de diferentes metodologias para a avaliação da atividade pozolânica. 1999. 118f. Dissertação (Mestrado em engenharia Civil) - Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 1999.
- GUZMÁN, A.; GUTIÉRREZ, C.; AMIGÓ, V.; MEJIA, G. R.; DELVASTO, S. Pozzolanic evaluation of the sugar cane leaf. *Materiales de Construcción*, Madrid, v. 61, n. 302, p.213-225, 2011.
- HOPPE, J. F.; CINCOTTO, M. A. Efeitos da cinza volante na resistência à compressão de concretos com alto teor de cinza volante e cal hidratada. In: CONGRESSO BRASILEIRO DO CONCRETO, 49, 2007, Bento Gonçalves. Anais... São Paulo: Instituto Brasileiro do Concreto, 2007.
- James J, Subba Rao M. Silica from rice husk through thermal decomposition, *Thermochim Acta*, vol. 97. Amsterdam: Elsevier Science; 1986. p. 329–36.
- KIHARA, Y; CENTURIONE, S. L. O Cimento Portland. In: CONCRETO: Ensino, pesquisa e realizações. São Paulo: IBRACON, 2005. p. 295-322.
- IBGE - Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. Pesquisa Nacional de Saneamento Básico 2000. Disponível em: <http://www.ibge.gov.br/home/estatistica/populacao/condicaodevida/pnsb>.
- Macedo, Pamela Camargo. Avaliação do desempenho de argamassas com adição de cinza do bagaço de cana-de-açúcar Dissertação (mestrado) - Universidade Estadual Paulista. Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira. Área de conhecimento: Estruturas, 2009-- Ilha Solteira : (s.n.), 2009.116 f. : il.
- MARTIRENA-HERNÁNDEZ, J. F.; MIDDENDORF, B.; GEHRKE, M.; BUDELMANN, H. Use of wastes of the sugar industry as pozzolana in lime-pozzolana binders: study of the reaction. *Cement and Concrete Research*. Elmsford, v. 28, n. 11, p. 1525-1536, 1998.
- MARTIRENA-HERNÁNDEZ, J. F.; BETANCOURT-RODRÍGUEZ, S.; MIDDENDORF, B.; RUBIO, A.; MARTÍNEZ-FERNÁNDEZ, L.; MACHADO-LÓPEZ, I.; GONZÁLEZLÓPEZ, R. Propiedades puzolánicas de desechos de La industria azucarera (primera parte). *Materiales de Construcción*, v.50, n. 260, p. 71-78, 2000.
- MEHTA, P. K.; Monteiro, P. J. M. *Concrete – microstructure and properties* 3ª ed. Usa: Mcgraw-Hill, 2005.

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

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

MINISTÉRIO DA AGRICULTURA, PECUÁRIA E ABASTECIMENTO - MAPA. Anuário estatístico da agroenergia / Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento. – Brasília : Mapa/ACS, 2009. 160 p. ISBN 978-85-99851-60-9.

Moayad N, Al-Khalaf, Yousiff HA. Use of rice husk ash in concrete. *The Int J Cem Compo Lightweight Concr* 1984;6(4):241–8

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

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

NIPE - Núcleo Interdisciplinar de Planejamento Energético/ UNICAMP - Universidade Estadual de Campinas.

NUNES, I. H. S.; VANDERLEI, R. D.; SECCHI, M.; ABE, M. A. P. Estudo das características físicas e químicas da cinza do bagaço de cana-de-açúcar para uso na construção civil. In: 7º Encontro Tecnológico da Engenharia Civil e Arquitetura. Anais do 7º ENTECA. Maringá: ENTECA, 2009.

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

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

RELATÓRIO UNICA. A Energia da Cana-de-Açúcar – Doze estudos sobre a agroindústria da cana-de-açúcar no Brasil e a sua sustentabilidade / Isaias de C. Macedo (org.); Eduardo P. de Carvalho (apres.). – São Paulo: Berlendis & Vertecchia : UNICA – União da Agroindústria Canavieira do Estado de São Paulo, 2005.

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

SARTORI, M. M. P.; FLORENTINO, H. O. Metodologia e técnicas experimentais: modelos de minimização de biomassa residual. *Bragantia*, Campinas, v. 61, n. 3, 297-303, 2002.

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

Silva, João Paulo Nunes da. Noções da cultura da cana-de-açúcar/João Paulo Nunes da Silva, Maria Regina Nunes da Silva. Inhumas: IFG; Santa Maria: Universidade Federal de Santa Maria, 2012 105 p. : il. ; 21

SOUTO, J.M.F.; VANDERLEI, R. D.; NUNES, I. H. S. Avaliação da cinza do bagaço de Cana-de-açúcar em substituição parcial de cimento Portland na produção de concretos. IN: 51º Congresso Brasileiro do Concreto. Anais do 51º CBC, Curitiba: IBRACON, 2009.

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

TASHIMA, M. M. Cinza de casca de arroz altamente reativa: método de produção, caracterização físico-química e comportamento em matrizes de cimento Portland. 2006. 80f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Faculdade de Engenharia, Universidade Estadual Paulista, Ilha Solteira, 2006.

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

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

PRÓ-ÁLCOOL. Programa Brasileiro do Álcool. Disponível em: <<http://www.biodieselbr.com/proalcool/pro-alcool.htm>>.

UNICA. Setor Sucreenergético - Mapa da Produção. [2009]. Disponível em: <<http://www.unica.com.br/content/show.asp?>>.

*<http://www.ebah.com.br/content/ABAAAemgoAC/extracao-areia?part=2>. Acesso em Março de 2016.*

*<http://www.dnpm.gov.br/dnpm/sumarios/areia-construcao-sumario-mineral-2014>. Acesso em Maio de 2016.*

*<http://construfacilrj.com.br/patologia-da-construcao-civil-principais-causas/>; Acesso: em Outubro de 2016.*

*<http://www.comunidade-da-construcao.com.br>. Acesso em Novembro de 2016.*

*<http://infap.org.br>. Acesso em Agosto de 2016.*

*<http://www.portalresiduossolidos.com>. Acesso em Agosto de 2016*