UNIVERSIDADE FEDERAL DE GOIÁS
ESCOLA DE ENGENHARIA CIVIL

DANIEL ANTÔNIO SILVEIRA

INFLUÊNCIA DA SUBSTITUIÇÃO PARCIAL DO CIMENTO PORTLAND PELA CINZA DO BAGAÇO DE CANA-DE-AÇÚCAR (CBC) RESIDUAL NO CONCRETO

Goiânia
2010

DANIEL ANTÔNIO SILVEIRA

INFLUÊNCIA DA SUBSTITUIÇÃO PARCIAL DO CIMENTO PORTLAND PELA CINZA DO BAGAÇO DE CANA-DE-AÇÚCAR (CBC) RESIDUAL NO CONCRETO

Dissertação apresentada ao Curso de Mestrado em Engenharia Civil da Escola de Engenharia Civil da Universidade Federal de Goiás, como exigência para obtenção do título de mestre em Engenharia Civil.

Área de Concentração: Materiais.

Orientador: Prof. Dr. Enio Pazini Figueiredo
Co-orientador: Dr. João Henrique da Silva Rêgo

Goiânia
2010

INFLUÊNCIA DA SUBSTITUIÇÃO PARCIAL DO CIMENTO PORTLAND PELA CINZA DO BAGAÇO DE CANA-DE-AÇÚCAR (CBC) RESIDUAL NO CONCRETO

DANIEL ANTÔNIO SILVEIRA

Dissertação de Mestrado defendida e aprovada em 22 de dezembro de 2010 pela banca examinadora constituída pelos professores:

_____

Professor Enio José Pazini Figueiredo, D.Sc (UFG)
(ORIENTADOR)

_____

Professor João Henrique da Silva Rêgo, D.Sc (UnB)
(CO-ORIENTADOR)

_____

Professor Regis de Castro Ferreira D.Sc (UFG)
(EXAMINADOR INTERNO)

_____

Professor Claudio Henrique de Almeida Feitosa Pereira D.Sc (UnB)
(EXAMINADOR EXTERNO)

AGRADECIMENTOS

Agradeço ao meu orientador prof. Dr. Enio Pazini Figueiredo pela indicação do tema tão importante e desafiador, pela disponibilidade, competência e pela amizade.

Ao co-orientador: João Henrique pelo incentivo ao ingresso no mestrado, e pela grande atenção em mostrar o caminho a seguir.

À Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Goiás (FAPEG) pelo apoio financeiro, por meio da Rede Goiana de Pesquisa em Reciclagem de Resíduos Agroindustriais para a Construção Civil.

À Furnas Centrais Elétricas S/A pela disponibilidade e apoio na execução dos ensaios.

Ao Centro Tecnológico de Engenharia Civil de Furnas, aos coordenadores da pesquisa: Alfredo Liduário e Nicole, ao Técnico Tizzo, Emerson, e aos Engenheiros Alexandre de Castro e Estênio.

Aos professores e funcionários do Curso de Mestrado em Engenharia Civil e aos funcionários Tancredo e Mario.

À Daniela e ao Engenheiro Diogo da usina Jalles Machado.

Aos técnicos: Tiago do Laboratório de Engenharia Civil da UCG, Deusair do Laboratório de Materiais de construção da UFG e Afonso do Laboratório do CEFET.

Aos amigos da SEFAZ, Bruna, Felipe, Sandra e Vera.

Ao pessoal da AGETOP.

À Realmix pela doação dos agregados e a atenção do amigo Bernardo.

À Votorantim Cimentos Brasil S/A pela doação do cimento, na pessoa do Flávio Oliveira.

Aos amigos do CMEC pela ajuda e agradável convivência, principalmente o Avelar e a Lara.

Ao professor Maurício Sales pelo incentivo durante a graduação, projeto de extensão científica e também pela carta de recomendação para o mestrado.

Aos meus pais, Rita e Antônio, pelo carinho e atenção. Ao meu irmão Lúcio e irmã Elisa.

À minha amada esposa Grazielle, pela tolerância e apoio inestimáveis.

A todos que de alguma forma contribuíram para a realização desta pesquisa.

A Deus que tornou isso tudo possível.

RESUMO

A cinza do bagaço de cana-de-açúcar (CBC) é um dos principais resíduos da indústria sucroalcooleira e um dos mais volumosos resíduos sólidos produzidos pelas indústrias brasileiras. Esta indústria produz anualmente milhões de toneladas de CBC a partir da queima do bagaço da cana no processo de co-geração de energia. De acordo com as estimativas da produção brasileira de cana-de-açúcar para 2010, espera-se que sejam produzidos 697 milhões de toneladas de cana-de-açúcar, podendo gerar mais de 181 milhões de toneladas de bagaço com 50% de umidade e a partir deste mais de 4,5 milhões de toneladas de CBC, se for considerado o pleno emprego da cana-de-açúcar para moagem e do bagaço como combustível nas caldeiras. O objetivo do presente trabalho foi de avaliar a influência da substituição parcial do cimento Portland CPV-ARI pela CBC residual obtida em uma indústria do Estado de Goiás sobre as propriedades mecânicas do concreto convencional e de alta resistência, bem como as propriedades relacionadas à durabilidade. O concreto também foi caracterizado ainda no estado fresco. Os teores de substituição adotados foram de 0%, 5%, 10% e 20% de CBC residual, em massa. Antes da utilização, a CBC residual foi submetida a um processo de peneiramento com abertura de malha 1,19 mm, secagem em estufa e moagem por 4 horas em moinho de bolas. Foram adotadas duas relações água/aglomerante (a/agl), de 0,37 e 0,60, resultando em oito dosagens de concreto. Os parâmetros de durabilidade foram determinados em ensaios de transporte de massa e resistência à carbonatação. Os ensaios de transporte de massa, como os ensaios de permeabilidade, absorção por capilaridade e por imersão, indicaram a presença do teor ótimo em torno de 10% de substituição em ambos os concretos. Quanto à profundidade de carbonatação, observou-se uma redução da resistência à carbonatação com o aumento da substituição da CBC residual. Para os ensaios de resistência mecânica a utilização da CBC residual em teores até 10% não comprometeu as propriedades do concreto.

Palavra-chave: Concreto, Adição Mineral, Resíduo Sólido Agroindustrial, Cinza do Bagaço de Cana-de-açúcar.

ABSTRACT

The Sugar Cane Bagasse Ash (SCBA) is a major waste of the sugar cane industry and one of the most bulky solid wastes produced by Brazilian Industries. This industry annually produces millions of tons of SCBA from cane bagasse burning in the cogeneration of energy. According to Brazilian estimatives of sugar cane production to the year 2010, it is been expected a production of 697 million tons of sugar cane, that can generate more than 181 million tons of bagasse with 50% moisture and from that 4,5 millions tons of SCBA, if considering that all sugar cane will be used to milling and the use of bagasse as a fuel to boilers. The aim of the study was to evaluate the influence of the partial replacement of CPV-ARI Portland Cement by the residual SCBA obtained from an industry on the State of Goiás on mechanical properties of ordinary and high strength concrete, as well as properties related to durability. Concrete was characterized even fresh. The replacement content used were 0%, 5%, 10% and 20% of residual SCBA, in mass. Before use, the SCBA was subjected to a sieving process (opening mesh 1.19 mm), drying and grinding for 4 hours in a ball mill. Two water/ binder relations (w/b), 0.37 and 0.60 were adopted, resulting 8 different concrete types. The durability parameters were determined in transport mass assays and carbonation resistance. The transport mass assays, as permeability assays, capillary absorption and by immersion indicated an excellent level of replacement around 10% in both concrete. With regard to carbonation depth was observed a small reduction in carbonation resistance as the increased of replacement partial of Portland cement by SCBA. For the analysis of mechanical strength using the CBC residual levels up to 10% did not affect the concrete properties.

Keywords: Concrete, Mineral Addition, Agribusiness Solid Waste, Sugar Cane Bagasse Ash.

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 – Evolução do consumo aparente de Cimento no Brasil em Milhões de toneladas (SNIC, 2010). 23
Figura 2.2 – Evolução percentual do uso de adições no Brasil (SNIC, 2010). 24
Figura 3.1 – Distribuição percentual da oferta energética brasileira em 2009 (BRASIL, 2010). . 27
Figura 3.2 – Evolução da oferta interna de energia no Brasil, em tep (BRASIL, 2010). 28
Figura 3.3 – Mapa de produção do setor sucroalcooleiro no Brasil (UNICA, 2010). 31
Figura 3.4 – (a) Processo de limpeza da cana; (b) Utilização da CBC na lavoura. 32
Figura 3.5 – Fluxograma resumido da produção de CBC (FREITAS, 2005). 33
Figura 3.6 – Efeito da temperatura de queima do bagaço de cana-de-açúcar na reatividade da CBC utilizando o método de Chapelle (CORDEIRO et al., 2008). 35
Figura 3.7 – Fibra do Bagaço de cana-de-açúcar (a), cinza escura com alto teor de carbono (b), cinza com menor teor de carbono (c) e cinza gerada após combustão completa (d). (Adaptado de CORDEIRO, 2006) 36
Figura 3.8 – (a) Fotomicrografia do bagaço de cana-de-açúcar ampliada 20 vezes; (b) Detalhe ampliada 200 vezes (CORDEIRO, 2006). 36
Figura 3.9 – Morfologia da cinza residual do bagaço de cana-de-açúcar. [(a) e (c)]; detalhe da estrutura altamente porosa da cinza [(b) e (d)]. As setas em amarelo indicam a presença de contaminação por partículas de quartzo (CORDEIRO, 2006). 37
Figura 3.10 – Difratograma de Raios-X da CBC Residual (CORDEIRO, 2006). 38
Figura 3.11 – Análise de difração de Raio-X da CBC (PAULA, 2006). 39
Figura 4.1 – Distribuição relativa à incidência das manifestações patológicas em estruturas de concreto armado (HELENE; FIGUEIREDO, 2003) adaptada. 43
Figura 4.2 – Célula simplificada de corrosão (CEB/BI 152, 1984) 44
Figura 4.3 – Porcentagem carbonatada em função da umidade relativa ambiente (VERBECK, 1950 apud FIGUEIREDO, 2005). 44
Figura 4.4 – Aspersão de solução de fenolftaleína em região recém fraturada do concreto. ... 45
Figura 4.5 – Fórmula estrutural da fenolftaleína (OSAWA et al., 2006). 46
Figura 5.2 – (a) Detalhe das esferas de aço utilizadas no moinho; (b) Moinho, com isolamento acústico, utilizado para moagem da CBC residual. 52
Figura 5.3 – (a) Equipamento de granulometria a laser; (b) Monitoramento do ensaio. 56
Figura 5.4 – Forma utilizada para determinação da massa específica do concreto fresco. 61

Figura 5.5 – Determinações do *slump*, (a) para o concreto e convencional e (b) para o CAD.62
Figura 5.6 – Ensaio para a determinação do teor de ar incorporado no concreto fresco.....62
Figura 5.7 – (a) Adensamento do concreto nas fôrmas; (b) corpos-de-prova cilíndricos. 64
Figura 5.8 – Dimensões dos corpos-de-prova prismáticos.....64
Figura 5.9 – Concretagem de corpos-de-prova prismáticos.....65
Figura 5.10 – (a) Capeamento dos corpos-de-prova; (b) Prensa do ensaio de compressão. 66
Figura 5.11 – Instrumentação utilizada para a determinação do módulo de elasticidade 66
Figura 5.12 – (a) Estado de tensões atuantes em elemento do diâmetro vertical do corpo-de-prova durante ensaio; (b) Tensões máximas de compressão (σ_y) e tração (σ_x). (Cordeiro, 2006) com adaptações. 68
Figura 5.13 – (a) Realização do ensaio de compressão diametral (b) Corpo-de-prova ensaiado..68
Figura 5.14 – Procedimento do ensaio de absorção capilar. 69
Figura 5.15 – Preparação dos corpos-de-prova do ensaio de permeabilidade e realização das leituras.....71
Figura 5.16 – Determinação de profundidade de carbonatação: (a) Corpos-de-prova da câmara de carbonatação; (b) Corpos-de-prova ao ar livre em laboratório (c) Câmara de carbonatação, com destaque da medida de umidade e temperatura (d) Determinação da profundidade de carbonatação. 73
Figura 5.17 – (a) Quebra dos corpos-de-prova prismáticos para determinação da profundidade de carbonatação e (b) aplicação de solução de fenolftaleína 73
Figura 6.1 – Curva granulométrica determinada por meio do granulômetro a laser.....77
Figura 6.2 – Difratograma de raios X da cinza do bagaço de cana-de-açúcar residual.....78
Figura 6.3 – Curva granulométrica do agregado miúdo.....82
Figura 6.4 – Curva granulométrica do agregado graúdo.....83
Figura 6.5 – Resistência à compressão do concreto com relação a/agl = 0,37.....86
Figura 6.6 – Resistência à compressão do concreto com Relação a/agl = 0,60. 87
Figura 6.7 – Análise gráfica dos resultados de resistência à compressão. 88
Figura 6.8 – Resistência à tração por compressão diametral (a/agl = 0,37 e 0,60). 89
Figura 6.9 – Módulo de elasticidade (a/agl = 0,37 e 0,60).....90
Figura 6.10 – Corpos de prova, a/agl = 0,37, nos teores de 0%, 5, 10 e 20%, respectivamente. 96
Figura 6.11 – Avanço da frente de carbonatação dos corpos-de-prova, a/agl = 0,60, nos teores de 0%, 5, 10 e 20%, respectivamente. 97

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 – Nomenclatura dos cimentos brasileiros criada em 1997 (ABCP, 2002) adaptado. 19
Tabela 2.2 – Composição dos cimentos Portland. 19
Tabela 2.3 – Especificações químicas dos cimentos Portland (NBR 5732, 11578, 5735, 5736, 5733) 20
Tabela 2.4 – Composição dos cimentos Portland 21
Tabela 2.5 – Produção anual de cimento Portland no Brasil, em mil toneladas[1] (SNIC, 2010). 22
Tabela 3.1 – Variação da oferta energética brasileira em toneladas equivalentes de petróleo nos anos de 2006 a 2007. Adaptado de Brasil (2008). 27
Tabela 3.2 – Composição química e principais sólidos solúveis da cana-de-açúcar, COPERSUGAR (2009). 29
Tabela 3.3 – Emissões de CO_2 na geração de energia elétrica com diferentes combustíveis (FIESP/CIESP, 2001), com adaptações. 30
Tabela 3.4 – Propriedades da CBC residual e ultrafina (CORDEIRO, 2006) 38
Tabela 3.1 – Teor de SiO_2 das CBC's, por vários autores (MACEDO, 2009) adaptado. 39
Tabela 4.1 – Fatores que influenciam a velocidade do avanço da frente de carbonatação (KAZMIERCZAK, 1995). 46
Tabela 5.1 – Resumo do programa experimental. 48
Tabela 5.2 – Origem dos materiais utilizados. 50
Tabela 5.3 – Ensaios de caracterização da CBC residual. 53
Tabela 5.4 – Propriedades do aditivo superplastificante, segundo o fabricante (SIKA, 2005). 57
Tabela 5.5 – Tempo de mistura e ordem de colocação de materiais na betoneira. 59
Tabela 5.6 – Composição do concreto convencional. 59
Tabela 5.7 – Composição do concreto de alto desempenho. 60
Tabela 5.8 – Quantidade, composição, dimensões e relação (a/agl) dos corpos-de-prova. 63
Tabela 6.1 – Propriedades físicas da CBC residual. 75
Tabela 6.2 – Propriedades químicas da CBC residual 76
Tabela 6.3 – Análise granulométrica por raio laser da CBC residual. 77
Tabela 6.4 – Caracterização física do cimento. 79
Tabela 6.5 – Caracterização química do cimento. 80

Tabela 6.6 – Propriedades do aditivo superplastificante, determinadas em Laboratório. 81
Tabela 6.7 – Caracterização do agregado miúdo. 82
Tabela 6.8 – Caracterização do agregado graúdo. 83
Tabela 6.9 – Caracterização dos concretos no estado fresco. 84
Tabela 6.10 – Valores de resistência à compressão e desvio padrão para o concreto com Relação a/agl = 0,37 e 0,60, para as idades de 7, 28 e 91 dias (MPa). 87
Tabela 6.11 – Valores de resistência à tração e desvio padrão aos 28 dias (MPa). 89
Tabela 6.12 – Valores de módulo de elasticidade aos 28 dias (GPa). 90
Tabela 6.13 – Comparativos dos valores de módulo de elasticidade aos 28 dias. 91
Tabela 6.14 – Valores da absorção por capilaridade (relação a/agl = 0,60). 92
Tabela 6.15 – Absorção por imersão, índice de vazios e massa específica (a/agl = 0,60). 93
Tabela 6.16 – Permeabilidade do concreto aos 63 dias (a/agl = 0,60). 95
Tabela 6.17 – Profundidade de carbonatação aos 290 dias (a/agl = 0,37). 96
Tabela 6.18 – Profundidade de carbonatação aos 290 dias (a/agl = 0,60). 97

LISTA DE ABREVIATURAS

A	Al_2O_3
ABCP	Associação Brasileira de Cimento Portland
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
AGETOP	Agência Goiana de Transporte e Obras
Al_2O_3	Óxido de Alumínio
ANEEL	Agência Nacional de Energia Elétrica
ARI	Alta Resistência Inicial
BET	Brunauer-Emmet-Teller, método de determinação da área superficial
CAD	Concreto de alto desempenho
CaO	Óxido de cálcio
$CaSO_4$	Sulfato de cálcio
CBC	Cinza do Bagaço de Cana-de-açúcar
CBC 5A	CAD com substituição de 5% do cimento por CBC residual
CBC 10A	CAD com substituição de 10% do cimento por CBC residual
CBC 20A	CAD com substituição de 20% do cimento por CBC residual
CC	Concreto Convencional
CBC 5	CC com substituição de 5% do cimento por CBC residual
CBC 10	CC com substituição de 10% do cimento por CBC residual
CBC 20	CC com substituição de 20% do cimento por CBC residual
CCA	Cinza da Casca de Arroz
cm	Centímetros
CO_2	Gás Carbônico (dióxido de carbono)
CP	Cimento Portland
DCT	Departamento de Controle Tecnológico
Eq.	Equação
FAPEG	Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Goiás
Fe_2O_3	Óxido de Ferro
Furnas	Furnas Centrais Elétricas S/A
IUPAC	International Union of Pure and Applied Chemistry
K_2O	Óxido de potássio
MPa	Mega Pascal
MgO	Óxido de magnésio
Na_2O	Óxido de sódio
NM	Norma MERCOSUL
PROÁLCOOL	Programa Nacional do Álcool
RCD	Resíduos de Construção e Demolição
REF	Mistura de referência com 100% de Cimento CP V – ARI
rpm	Rotações por minuto
SNIC	Sindicato Nacional da Indústria do Cimento
SiO_2	Dióxido de Silício
SO_3	Trióxido de Enxofre
tep	toneladas equivalentes de petróleo
UCG	Universidade Católica de Goiás
UFG	Universidade Federal de Goiás
UNICA	União da indústria de cana-de-açúcar

SUMÁRIO

AGRADECIMENTOS **3**

RESUMO **4**

ABSTRACT **5**

LISTA DE FIGURAS **6**

LISTA DE TABELAS **8**

LISTA DE ABREVIATURAS **10**

1 INTRODUÇÃO **14**

1.1 JUSTIFICATIVA E RELEVÂNCIA DO TEMA 15

1.2 OBJETIVOS 16

1.2.1 Objetivo geral **16**

1.2.2 Objetivos específicos **16**

1.3 ORGANIZAÇÃO DA DISSERTAÇÃO 17

2 CIMENTO PORTLAND **18**

2.1 CONSUMO DO CIMENTO NO BRASIL 22

2.2 ADIÇÕES MINERAIS 23

3 CINZA DO BAGAÇO DE CANA-DE-AÇÚCAR **26**

3.1 MERCADO SUCROALCOOLEIRO NO BRASIL 26

3.2 CULTIVO DE CANA 28

3.3 MERCADO DO ETANOL 31

3.4 A ORIGEM DA CINZA DO BAGAÇO DA CANA-DE-AÇÚCAR 32

3.5 A CINZA DO BAGAÇO DA CANA-DE-AÇÚCAR COMO ADIÇÃO MINERAL 34

4 ENSAIOS RELATIVOS À DURABILIDADE NO CONCRETO **40**

4.1 ABSORÇÃO 40

4.2 PERMEABILIDADE 41

4.3 CARBONATAÇÃO 42

4.3.1 Determinação da profundidade de carbonatação **45**

5 PROGRAMA EXPERIMENTAL, MATERIAL E MÉTODOS 47
5.1 VARIÁVEIS ESTUDADAS 49
5.1.1 Variáveis independentes 49
5.1.2 Variáveis dependentes 49
5.2 CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS E ESTUDO DE DOSAGEM 50
5.2.1 CBC residual 50
5.2.1.1 Coleta e transporte 51
5.2.1.2 Peneiramento e secagem 51
5.2.1.3 Moagem da CBC residual 51
5.2.1.4 Armazenamento e homogeneização 52
5.2.2 Caracterização dos aglomerantes 53
5.2.3 Caracterização do aditivo superplastificante 57
5.2.4 Caracterização dos agregados 58
5.2.5 Parâmetros de mistura do concreto 58
5.3 DETERMINAÇÃO DAS PROPRIEDADES DO CONCRETO FRESCO 61
5.3.1 Determinação da massa específica – Método gravimétrico 61
5.3.2 Determinação do abatimento 61
5.3.3 Ar incorporado - Método pressométrico 62
5.4 CORPOS-DE-PROVA DE CONCRETO 63
5.4.1 Moldagens dos corpos-de-prova cilíndricos 63
5.4.2 Moldagens dos corpos-de-prova prismáticos 64
5.5 PROPRIEDADES MECÂNICAS DO CONCRETO 65
5.5.1 Resistência à compressão e módulo de elasticidade 65
5.5.2 Resistência à tração por compressão diametral 67
5.6 ENSAIOS RELATIVOS À DURABILIDADE 69
5.6.1 Determinação da absorção de água por capilaridade 69
5.6.2 Determinação da absorção de água por imersão, índice de vazios e massa específica dos concretos 70
5.6.3 Permeabilidade 71
5.6.4 Profundidade de carbonatação do concreto 72
5.7 ANÁLISE ESTATÍSTICA 74

6 APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS 75
6.1 CARACTERIZAÇÃO DA CBC RESIDUAL 75
6.1.1 Propriedades físicas e químicas 75
6.1.2 Análise granulométrica 77
6.1.3 Difração de Raios X 78

6.2 CARACTERIZAÇÃO DO CIMENTO 79
6.3 CARACTERIZAÇÃO DO ADITIVO SUPERPLASTIFICANTE 81
6.4 CARACTERIZAÇÃO DOS AGREGADOS 81
6.4.1 Caracterização do agregado miúdo 81
6.4.2 Caracterização do agregado graúdo 83
6.5 PROPRIEDADES DO CONCRETO FRESCO 84
6.6 PROPRIEDADES DO CONCRETO ENDURECIDO 86
6.6.1 Resistência à compressão 86
6.6.2 Resistência à tração por compressão diametral 89
6.6.3 Módulo de elasticidade 90
6.6.4 Absorção de água por capilaridade 92
6.6.5 Absorção de água por imersão, índice de vazios e massa específica 93
6.6.6 Permeabilidade 95
6.6.7 Resultados da carbonatação natural e acelerada no concreto 96

7 CONCLUSÕES 98
7.1 CARACTERIZAÇÃO DA CBC RESIDUAL 98
7.2 CARACTERIZAÇÃO DO CONCRETO NO ESTADO FRESCO 98
7.3 CARACTERIZAÇÃO DO CONCRETO NO ESTADO ENDURECIDO 99
7.4 ENSAIOS DE DURABILIDADE 99
7.5 CONCLUSÕES GERAIS 100
7.6 SUGESTÕES PARA PESQUISAS FUTURAS 100

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS 102

1 INTRODUÇÃO

O concreto armado está presente na grande maioria das obras de infra-estrutura da sociedade. Suas excelentes propriedades mecânicas, baixo custo, facilidade de execução e adaptação aos mais diversificados projetos arquitetônicos o tornam o material mais empregado nas construções. Entretanto, nas últimas décadas, tem sido amplamente estudado o quanto o concreto armado pode ser considerado um material durável, bem como os mecanismos para garantir esta durabilidade (MEHTA; MONTEIRO, 2008).

Entre as alternativas para melhorar a durabilidade do concreto pode-se destacar o uso de adições minerais para substituir parte do cimento Portland sem perda significativa de desempenho mecânico do concreto. Entre as adições minerais que podem ser empregadas, mas que ainda não foram completamente estudadas, tem-se a cinza do bagaço da cana-de-açúcar (CBC) que é o objeto de estudo da presente pesquisa.

De acordo com as estimativas da produção brasileira de cana-de-açúcar para 2010, espera-se que sejam produzidos 697 milhões de toneladas de cana-de-açúcar, podendo gerar mais de 181 milhões de toneladas de bagaço com 50% de umidade e a partir deste mais de 4,5 milhões de toneladas de CBC, se for considerado o pleno emprego da cana-de-açúcar para moagem e do bagaço como combustível nas caldeiras.

O crescimento da produção agrícola deve dar–se com base na produtividade. Deverá ser mantido forte crescimento da produtividade total dos fatores como trabalhos recentes têm mostrado. Os resultados revelam maior acréscimo da produção agropecuária que os acréscimos de área. As previsões realizadas até 2018/19 a área de cana deve crescer de 6,0 milhões de hectares.

O Brasil deve melhorar sua posição no comércio mundial, segundo as projeções do MAPA (2009) para o agronegócio de 2008/2009 até 2018/2019, dada a relação entre quantidade de exportação e comércio mundial. Para o açúcar, essa relação passará de 58,4 % na safra 2008/2009 para 74,3 % na safra 2018/2019. É esperado um crescimento de 6,0 milhões de hectares na área plantada de cana-de-açúcar.

O Estado de Goiás tem apresentado um crescente aumento da indústria sucroalcooleira, com isso, espera-se que nos próximos anos a CBC seja um dos resíduos agroindustriais com maior produção no Estado.

1.1 JUSTIFICATIVA E RELEVÂNCIA DO TEMA

Segundo Mehta e Monteiro (2008), o consumo mundial anual de concreto é de 1m³ por habitante. Este consumo é tão elevado que faz do concreto o segundo material mais consumido pela humanidade, só perdendo para a água. O Brasil, como um país emergente, possui uma demanda crescente de energia. Na matriz energética brasileira, em 2009, os produtos derivados da cana-de-açúcar, tal como o álcool etílico e o bagaço da cana-de-açúcar, produzem 18,1% de toda energia ofertada no Brasil, superando os 15,3% de energia advinda da energia hidráulica e elétrica em quase três pontos percentuais (BRASIL, 2010).

A produção de cana-de-açúcar no Brasil nas últimas décadas e a cada ano vem sendo ampliada de forma expressiva. Na safra de 2009 obteve-se mais de 689 milhões de toneladas e ainda para 2010 é esperado um aumento de 1,2 % na produção, atingindo, então, mais de 697 toneladas de cana-de-açúcar para o ano de 2010 (IBGE, 2010).

O processo de produção do álcool etílico e do açúcar nas indústrias sucroalcooleiras gera subprodutos líquidos como a vinhaça e a torta de filtro, que são reutilizados na irrigação, e o bagaço da cana-de-açúcar. Este último normalmente é queimado na própria usina para produzir vapor capaz de movimentar as turbinas para moagem da cana e ainda gerar energia elétrica (co-geração). Nesta etapa tem-se como resíduo a cinza do bagaço da cana-de-açúcar (CBC) que se constitui em um material de difícil degradação e que atualmente não conta com uma destinação final adequada.

A substituição de parte do cimento no concreto por CBC contribui com a redução do dióxido de carbono (CO_2) liberado no processo produtivo do clínquer. Segundo Cordeiro (2006) para cada tonelada produzida de clínquer são emanados aproximadamente 800 quilos de gás carbônico para o planeta. Portanto, para cada tonelada de adição mineral empregada na fabricação do concreto evita-se a liberação de 0,8 toneladas de CO_2, além do dispêndio financeiro relativo ao custo do cimento.

Segundo Isaia e Gastaldini (2004), a substituição de cimento Portland por adições tais como a escória granulada de alto forno e cinza volante podem ocorrer com altos teores e ainda com significativa vantagens. Estas adições, assim como a CBC, são resíduos industriais com grande disponibilidade e segundo os autores a adição em até 90%, contribuiu para a redução de 5% no custo, 81% na emissão de CO_2, 58% no consumo de energia e 34% de aumento do índice médio de durabilidade do concreto. A cada tonelada produzida de cimento são consumidos aproximadamente 5,5 GJ de energia e liberados 1 t de CO_2 no meio ambiente.

Para o ano de 2005, estima-se uma emissão de 1,8 Gt de CO_2, o que corresponde a 6% da emissão total.

A indústria da construção civil apresenta grande potencial de aproveitamento de subprodutos de outras indústrias, como é o caso da escória granulada de alto forno, sílica ativa e cinza da casca de arroz (CCA), como adição ao concreto ou substituição de parte do cimento utilizado. A viabilidade da utilização de subprodutos industriais como adição mineral tem sido pesquisada por diversos autores. A utilização da CCA é um claro exemplo, pois tem sido objeto de estudo de autores como Mehta (1977), Dass (1984), Isaia (1995), Silveira (1996), Rêgo (2001; 2004), dentre outros.

A utilização da CBC em concretos e argamassa como adição mineral ainda necessita de estudo. Entretanto, com o rápido crescimento do mercado sucroalcooleiro e maior geração da CBC residual, recentemente, alguns pesquisadores têm se dedicado a conhecer melhor esta adição mineral. Alguns resultados, como a melhoria da trabalhabilidade do concreto sem redução significativa da resistência, indicam que a substituição de parte do cimento por CBC é viável tecnicamente (ZARDO, 2004; FREITAS, 2005; CORDEIRO, 2006; BORLINI et al., 2006; MACEDO, 2009).

1.2 OBJETIVOS

1.2.1 Objetivo geral

O presente trabalho visa avaliar a influência da substituição parcial do Cimento Portland CPV-ARI pela cinza do bagaço da cana-de-açúcar (CBC) residual nas propriedades do concreto convencional e de alta resistência, com a realização de diversos ensaios no concreto, tanto no estado fresco quanto no endurecido.

1.2.2 Objetivos específicos

- Caracterizar a cinza do bagaço da cana-de-açúcar (CBC) residual produzida em uma grande usina do estado de Goiás;
- Identificar as propriedades do concreto com CBC residual no estado fresco;
- Analisar a influência da substituição da CBC residual, nas propriedades mecânicas do concreto de relação a/agl igual a 0,37 (alta resistência) e 0,60 (convencional);
- Avaliar a influência da substituição da CBC residual na durabilidade do concreto no que se refere à absorção de água, permeabilidade e resistência à carbonatação.

1.3 ORGANIZAÇÃO DA DISSERTAÇÃO

Essa dissertação encontra-se dividida em sete capítulos. No primeiro capítulo são apresentadas as justificativas, relevância do tema e os objetivos da pesquisa.

O capítulo dois abrange conceitos sobre o cimento Portland, seu consumo no Brasil e a utilização de adições minerais. A cinza do bagaço de cana-de-açúcar (CBC) é abordada no Capítulo três, que trata do mercado sucroalcooleiro no Brasil, cultivo da cana, mercado do etanol e sobre a utilização da CBC como adição mineral.

Os ensaios relativos à durabilidade do concreto são estudados no capítulo quatro, incluindo a absorção, permeabilidade e o efeito da carbonatação no concreto.

No capítulo cinco, a metodologia empregada no programa experimental abrange as variáveis de estudo, caracterização dos insumos utilizados e o estudo de dosagem. A metodologia adotada para a determinação das propriedades do concreto no estado fresco, propriedades mecânicas e ensaios relativos à durabilidade dos concretos produzidos também são apresentados neste capítulo.

Os resultados dos ensaios do capítulo cinco são apresentados e discutidos no capítulo seis.

Por fim, no capítulo sete são apresentadas as conclusões e sugestões para futuras pesquisas extraídas do trabalho realizado.

2 CIMENTO PORTLAND

O cimento é conhecido como um material finamente moído que possui minerais em sua constituição capazes de promover propriedades ligantes quando combinado com água. É considerado hidráulico, pois os produtos de sua hidratação são estáveis quando voltam a ter contato com a água. As reações químicas de hidratação dos componentes do cimento Portland são acompanhadas de trocas de matéria e energia, fato este que confere as propriedades do concreto realizado com este aglomerante (MEHTA; MONTEIRO, 2008).

A NBR 5732 (ABNT, 1991a) atribui ao cimento Portland o conceito de um produto da moagem de clínquer Portland resultando em um aglomerante hidráulico. Durante este processo adiciona-se a quantidade necessária de uma ou mais formas de sulfato de cálcio, bem como é possível adicionar materiais pozolânicos, materiais carbonáticos e escórias granuladas de alto-forno.

De acordo com Mehta e Monteiro (2008), o cimento Portland é constituído principalmente de silicatos de cálcio e para sua produção deve-se adequar as proporções de cálcio e sílica presentes nas matérias-primas. O complemento de sílica para compor os silicatos de cálcio é realizado de preferência com argilas e xistos argilosos, uma vez que a sílica oriunda do quartzo não reage facilmente.

Os cimentos comercializados no Brasil seguem padrões de qualidade exigidos por normas da Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT). Os parâmetros exigidos, tais como resistências mínimas para cada idade da argamassa produzida, variam de acordo com o tipo de cimento. A nomenclatura destes cimentos, suas siglas e as normas da ABNT correspondentes podem ser observadas na Tabela 2.1.

Tabela 2.1 – Nomenclatura dos cimentos brasileiros criada em 1997 (ABCP, 2002) adaptado.

Nome Técnico	**Sigla**	**NBR ABNT**
Cimento Portland comum	CP I	NBR 5732:1991
Cimento Portland comum com adição	CP I-S	
Cimento Portland composto com escória	CP II-E	NBR 11578:1991
Cimento Portland composto com pozolana	CP II-Z	
Cimento Portland composto com fíler	CP II-F	
Cimento Portland de alto-forno	CP III	NBR 5735:1991
Cimento Portland pozolânico	CP IV	NBR 5736:1991
Cimento Portland de alta resistência inicial	CP V-ARI	NBR 5733:1991
Cimento Portland resistente a sulfatos	Sigla e classe com sufixo RS	NBR 5737:1991
Cimento Portland de baixo calor de hidratação	Sigla e classe com sufixo BC	NBR 13116:1994
Cimento Portland branco estrutural	CPB	NBR 12989:1993
Cimento Portland branco não estrutural	CPB	
Cimento para poços petrolíferos	CPP	NBR: 9831:2006

A previsão das características do cimento deve ser precedida do conhecimento dos compostos do cimento Portland. O cimento Portland é um aglomerante hidráulico obtido pela moagem de clínquer Portland ao qual se adiciona a quantidade necessária de uma ou mais formas de sulfato de cálcio, durante a operação. No processo de moagem é permitido adicionar a esta mistura materiais pozolânicos, escórias granuladas de alto forno e/ou materiais carbonáticos, conforme especificado na Tabela 2.2. No Brasil existem vários tipos de cimento Portland principalmente em função de sua composição.

Tabela 2.2 – Composição dos cimentos Portland.

Tipos de cimentos Portland	**Composição (% em massa)**					**Norma**
	Sigla	**Clínquer + Gesso**	**Escória granulada de alto-forno (E)**	**Material Pozolânico (Z)**	**Material Carbonático (F)**	
Comum	CPI	100		-		NBR 5732
	CPI-S	99-95		1-5		
Composto	CPII-E	94-56	6-34	-	0-10	NBR 11578
	CPII-Z	94-76	-	6-14	0-10	
	CPII-F	94-90	-	-	6-10	
Alto forno	CPIII	65-25	35-70	-	0-5	NBR 5735
Pozolânico	CPIV	85-45	-	15-50	0-5	NBR 5736
Alta resistência inicial	CPV-ARI	100-95	-	-	0-5	NBR 5733

O tipo de cimento utilizado em um empreendimento é escolhido em função das propriedades desejadas da argamassa ou concreto a ser produzido, bem como, da disponibilidade de comercialização na região de utilização do material. Parâmetros como tempo de desforma, tipo de cura e condição de aplicação devem ser levados em conta na escolha do cimento (CORDEIRO, 2006).

Os vários tipos de cimento brasileiros são controlados por normas da ABNT. As exigências químicas e físicas para cada tipo de cimento são apresentadas nas Tabelas 2.3 e 2.4, respectivamente.

Tabela 2.3 – Especificações químicas dos cimentos Portland (NBR 5732, 11578, 5735, 5736, 5733)

Tipos de cimentos Portland	Resíduo Insolúvel (%)	Perda ao fogo (%)	MgO (%)	SO_3 (%)	CO_2 (%)	S (%)
CPI	≤ 1,0	≤ 2,0	≤ 6,5	≤ 4,0	≤ 1,0	-
CPI-S	≤ 5,0	≤ 4,5			≤ 3,0	-
CPII-E	≤ 2,5	≤ 6,5	≤ 6,5	≤ 4,0	≤ 5,0	-
CPII-Z	≤ 16,0					-
CPII-F	≤ 2,5					-
CPIII	≤ 1,5	≤ 4,5	≤ 6,5	≤ 4,0	≤ 3,0	≤ 1,0[1]
CPIV [2,3]	- [4]	≤ 4,5	≤ 6,5	≤ 4,0	≤ 3,0	-
CPV-ARI	≤ 1,0	≤ 4,5	≤ 6,5	≤ 3,5 / ≤ 4,5[5]	≤ 3,0	-

[1] Ensaio facultativo
[2] A atividade pozolânica do cimento, determinada conforme a NBR 5753, deve ser positiva.
[3] A atividade do material pozolânico, determinada conforme a NBR 5752, deve ser maior que 75%.
[4] O teor de material pozolânico deve ser determinado pelo ensaio de resíduo insolúvel.
[5] O teor de SO_3 igual a 3,5 aplica-se quando $C_3A \leq 8,0$ e 4,5% quando $C_3A \geq 8,0\%$.

Tabela 2.4 – Composição dos cimentos Portland

Tipos de cimentos Portland	Classe	Finura		Tempo de pega (h)		Expansibilidade (mm)		Resistência à compressão (MPa)				
		Resíduo na Peneira 75 μm (%)	Área específica (m^2/kg)	Início	Fim	A frio	A quente	1 dia	3 dias	7 dias	28 dias	91 dias
CPI CPI-S	25	≤ 12,0	≥ 240	≥ 1	≤ 10 (1)	≤ 5(1)	≤ 5	-	≥ 8,0	≥ 15,0	≥ 25,0	-
	32	≤ 12,0	≥ 260						≥ 10,0	≥ 20,0	≥ 32,0	-
	40	≤ 10,0	≥ 280						≥ 15,0	≥ 25,0	≥ 40,0	-
CPII-E CPII-Z CPII-F	25	≤ 12,0	≥ 240	≥ 1	≤ 10 (1)	≤ 5(1)	≤ 5	-	≥ 8,0	≥ 15,0	≥ 25,0	-
	32	≤ 12,0	≥ 260						≥ 10,0	≥ 20,0	≥ 32,0	-
	40	≤ 10,0	≥ 280						≥ 15,0	≥ 25,0	≥ 40,0	-
CPIII	25	≤ 8,0	-	≥ 1	≤ 12 (1)	≤ 5(1)	≤ 5	-	≥ 8,0	≥ 15,0	≥ 25,0	≥ 32,0 (1)
	32								≥ 10,0	≥ 20,0	≥ 32,0	≥ 40,0 (1)
	40								≥ 15,0	≥ 25,0	≥ 40,0	≥ 48,0 (1)
CPIV	25	≤ 8,0	-	≥ 1	≤ 12 (1)	≤ 5(1)	≤ 5	-	≥ 8,0	≥ 15,0	≥ 25,0	≥ 32,0 (1)
	32								≥ 10,0	≥ 20,0	≥ 32	≥ 40,0 (1)
CPV-ARI		≤ 6,0	≥ 300	≥ 1	≤ 10 (1)	≤ 5(1)	≤ 5	≥ 14,0	≥ 24,0	≥ 34,0	-	-

(1) Ensaio facultativo

2.1 CONSUMO DO CIMENTO NO BRASIL

A economia do Brasil tem apresentado um expressivo crescimento nos últimos anos. No ano de 2008, por exemplo, o setor da construção teve crescimento de 8,0% e o cimento, com um consumo de 51,97 milhões de toneladas, cresceu 11,6% em relação a 2007. Este crescimento superou a taxa de crescimento do Produto Interno Bruto (PIB) brasileiro que foi de 5,1% (4,0% per capita) no mesmo ano (IBGE, 2010; SNIC, 2010).

As diferenças dos vários tipos cimentos Portland existentes no Brasil decorrem das composições específicas de cada tipo. O cimento do tipo CP II é o mais encontrado, representando aproximadamente 67% do total de cimento produzido no ano de 2009. A produção brasileira anual de cimento Portland, nos últimos seis anos de acordo com o SNIC (2010), é descrita na Tabela 2.5.

Tabela 2.5 – Produção anual de cimento Portland no Brasil, em mil toneladas[1] (SNIC, 2010).

Ano	**Tipos de cimento**						**Subtotal**	**Ajustes**	**Total**
	CP I	CP II	CP III	CP IV	CP V	Branco			
2004	683	23.829	5.155	2.794	1.952	87	34.500	1.484	35.984
2005	786	25.180	6.792	2.545	2.040	96	37.439	1.266	38.705
2006	794	27.116	7.239	2.846	2.436	93	40.524	1.371	41.895
2007	1.034	29.848	7.842	3.876	3.254	115	45.969	582	46.551
2008	346	33.080	8.879	5.714	3.577	86	51.682	288	51.970
2009	84	34.662	7.967	5.097	3.377	-	51.187	560	51.747

[1] Dados estimados.

O reaquecimento do mercado do cimento tem sido motivado, entre outros fatores, pelo aumento da renda e da massa salarial real brasileira, expansão do setor da construção e do crédito imobiliário financiado pelo governo e bancos particulares. O setor público de obras de infra-estruturas também vem recebendo maior investimento. O comportamento da economia brasileira geralmente acompanha ou é acompanhado pelo comportamento do consumo de cimento. Esta tendência é confirmada na Figura 2.1 (SNIC, 2010) na qual é apresenta a evolução do consumo aparente de cimento nas últimas quatro décadas.

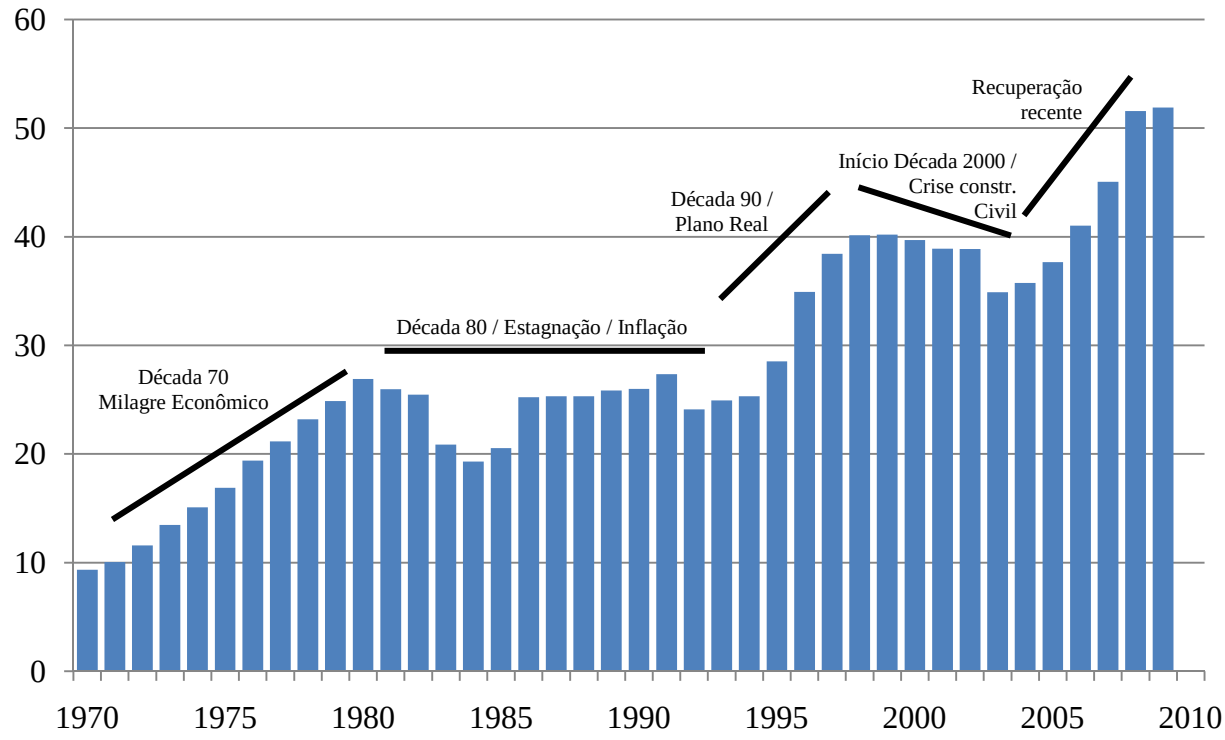

Figura 2.1 – Evolução do consumo aparente de Cimento no Brasil em Milhões de toneladas (SNIC, 2010).

2.2 ADIÇÕES MINERAIS

Alguns casos de sucesso com a utilização de subprodutos de outras industriais no setor da construção civil não estão sendo aplicados na prática. Tem-se conseguido demonstrar a viabilidade técnica no emprego de diversos resíduos tais como a escória, cinza volante, borracha de pneus usados, resíduos de construção e demolição (RCD) e cinzas oriundas de sistema de co-geração de energia como a cinza da casca de arroz (CCA) e a cinza do bagaço de cana-de-açúcar (CBC).

Segundo Sindicato Nacional da Indústria do Cimento (SNIC, 2010), há mais de 50 anos, a indústria nacional de cimento utiliza adições, provenientes de subprodutos de outras atividades industriais e matérias primas alternativas, na composição de cimento. Atualmente esta prática é seguida em todo o mundo. O cimento é um material caro e que demanda grande consumo de energia para sua fabricação. Desta forma espera-se que no futuro sejam empregados, cada vez mais, materiais alternativos e suas combinações produzindo concretos de melhor desempenho, com menores gastos de energia e mais econômicos (RÊGO, 2004). Estas perspectivas, atualmente, podem ser comprovadas por meio

do relatório anual do SNIC (2010) que mostra a evolução percentual do uso de adições no Brasil (Figura 2.2).

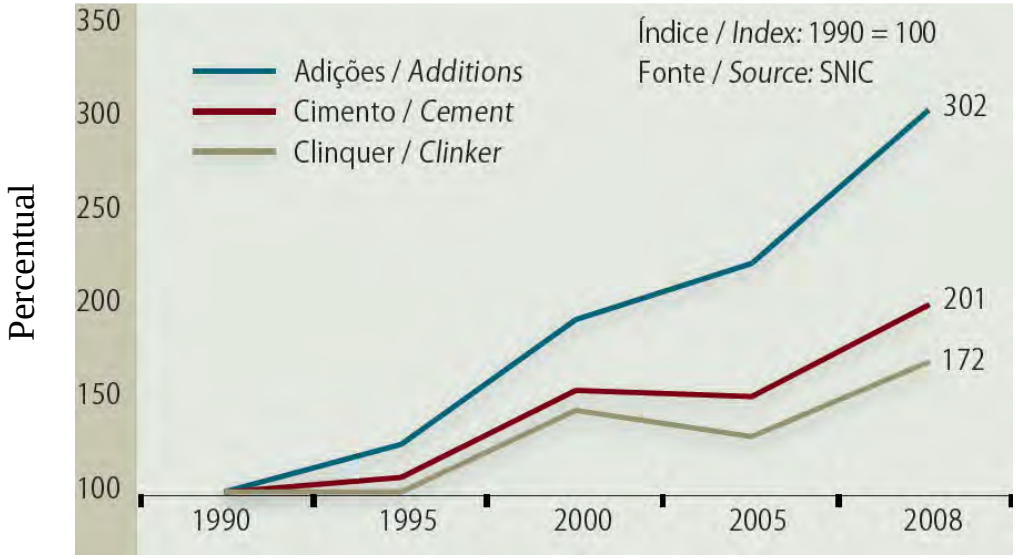

Figura 2.2 – Evolução percentual do uso de adições no Brasil (SNIC, 2010).

As vantagens do uso de altos teores de adições minerais no concreto foram investigadas por Isaia e Gastaldini (2004) em um estudo de caso com misturas de 50% e 90% de cinza volante e escória de alto-forno, em misturas binárias e ternárias. Foram calculados os custos dos materiais, a emissão de CO_2, o consumo de energia e os parâmetros de durabilidade do concreto que influem na corrosão da armadura. De acordo com os resultados encontrados, com a redução do teor de cimento na mistura, decresceram o custo, a emissão de CO_2 e a energia consumida, e aumentou-se a durabilidade do concreto, mostrando a viabilidade e as vantagens em todos os aspectos analisados da substituição de cimento por altos teores de adições minerais. Neste estudo de caso foi mostrado que os ganhos ambientais, técnicos e econômicos são proporcionais ao teor de cimento substituído pela adição mineral. O traço com 70% de escória e 20% de cinza volante, mistura de melhor desempenho, apresentou reduções de 5% no custo, 58% no consumo de energia, 81% na emissão de CO_2 e aumento de 34% no índice de durabilidade, em relação ao concreto de cimento Portland, com relações entre custo e beneficio ambiental e de durabilidade, respectivamente, 3,4 e 1,6 vezes menores.

A diversidade dos cimentos existentes no mercado decorre principalmente do uso de adições tais como a escórias e as pozolanas. Algumas propriedades do concreto podem ser aprimoradas com estes materiais, tais como a redução da porosidade, permeabilidade, e o calor de hidratação, além de permitir maior resistência a sulfatos. As adições contribuem com

a preservação de jazidas de calcário e com a redução na demanda de energia durante a fabricação do cimento Portland, aproveitando subprodutos que seriam poluidores ao meio ambiente e garantindo para estes uma correta destinação final (ABCP, 2008).

A escória granulada de alto-forno é gerada na fabricação do ferro-gusa e possui atividade hidráulica sendo capaz de gerar os mesmos produtos que o cimento na hidratação. Dentre os materiais pozolânicos destacam-se as cinzas volantes, argilas calcinadas e sílica ativa. Estes materiais são capazes de diluir o aluminato cálcico (C3A), presente no clínquer e reduzir o calor de hidratação do cimento composto. A combinação das pozolanas com a cal produzida na hidratação do cimento aumenta a resistência aos ataques químicos e diminui a permeabilidade na pasta do concreto (ABCP, 2008).

As adições minerais empregadas em cimentos, argamassas e concretos tem como finalidade a alteração das suas características de acordo com a NBR 11172 (ABNT, 1992a). Entretanto, o conhecimento das características químicas e físicas destas adições é necessário em virtude da grande diversidade e da variação nas propriedades de uma mesma adição obtida em locais e de modos diferentes.

O tempo de moagem de uma adição mineral pozolânica influencia de forma marcante a sua reatividade, pois o processo de moagem proporciona um maior refinamento dos grãos e, consequentemente, uma maior superfície específica. Mehta e Monteiro (2008) defendem que após o processo de moagem as partículas passam a desenvolver maior atividade pozolânica. Para Neville (1997), uma pozolana deve ser finamente subdividida, porque somente desta forma a sílica pode combinar com o hidróxido de cálcio, oriundo da hidratação do cimento Portland, na presença de água para formar silicatos estáveis e com propriedades cimentícias. O estado vítreo (amorfo) da sílica é uma condição quase que necessária, pois quando cristalina sua reatividade é muito pequena. O teor de sílica vítrea é comumente determinado por espectroscopia, por difração de raios X ou por dissolução em ácido clorídrico e hidróxido de potássio.

Em um estudo com a CCA, Rêgo (2002) trabalhou com corpos-de-prova desta adição mineral moídas em dois tempos distintos de moagem iguais a três e cinco horas. Enquanto o tempo de moagem de três horas conferiu um diâmetro médio de 19,78 μm para as partículas de CCA, com cinco horas de moagem este valor atingiu 15,19 μm. A atividade pozolânica medida com o cimento Portland cresceu de 77,70% para 84,50% utilizando cinco horas de moagem, fato este que comprovou o ganho de reatividade com a diminuição das partículas desta adição mineral.

3 CINZA DO BAGAÇO DE CANA-DE-AÇÚCAR

3.1 MERCADO SUCROALCOOLEIRO NO BRASIL

Atualmente, no Brasil, pode ser observada uma conjuntura econômica com forte interesse na evolução tecnológica e desenvolvimento de combustíveis alternativos, favorecidos pela crescente preocupação ambiental e intenção de reduzir a dependência de produtos derivados de petróleo. Na década de 1970, a crise generalizada e a alta do preço do petróleo alertaram os governos a respeito da necessidade de se estimular o uso de energia a partir de fontes renováveis (VIAN et al., 2008).

A implantação do Programa Nacional do Álcool (PROÁLCOOL) em 1975 no Brasil representou um exemplo mundial no uso de biomassa para geração de energia. Em 2003 com a produção de carros bicombustíveis, movidos a álcool e/ou gasolina, o Brasil retomou o consumo de energias renováveis. Desde então as tecnologias tem avançado de forma expressiva para uma maior utilização de fontes renováveis de Energia, mas o mundo ainda é dependente do petróleo (CORDEIRO, 2006; VIAN et al., 2008).

O aumento das fontes de energias renováveis na matriz energética brasileira nos últimos anos vem sendo relatada anualmente pelo Balanço Energético Nacional promovido pela Empresa de Pesquisa Energética e pelo Ministério das Minas e Energia. Os resultados do ano de 2006 e 2007 chamam a atenção, pois a energia oriunda dos produtos da cana-de-açúcar superou a produção energética da energia hidráulica e elétrica. Esta expansão deve-se ao uso do bagaço no processo de co-geração de eletricidade nas usinas sucroalcooleiras e da intensificação do uso de etanol por veículos leves, denominados *flex fuel*, ou seja, aceitam qualquer teor de mistura entre a gasolina e o álcool etílico hidratado (BRASIL, 2008).

No ano de 2007, 36,7% da oferta de energia brasileira teve como origem o petróleo e seus derivados. Analisando a oferta interna de energia do Brasil neste mesmo ano (Tabela 3.1), as fontes de energias renováveis representaram um total de 128,3 milhões de toneladas equivalentes de petróleo (tep). Nesta tabela pode ser observado um aumento de 9,4% na geração nacional de energia renovável em comparação com o ano de 2006 (BRASIL, 2008).

Tabela 3.1 – Variação da oferta energética brasileira em toneladas equivalentes de petróleo nos anos de 2006 a 2007. Adaptado de Brasil (2008).

Fonte de energia	Ano		Variação (%)
	2006	2007	
Energia não renovável	124,4	128,3	3,1
Petróleo e derivados	85,5	87,9	2,8
Gás natural	21,6	22,3	3,0
Carvão mineral e derivados	13,6	14,8	8,6
Urânio (U_3O_8) e Derivados	3,7	3,3	-9,9
Energia renovável	101,5	111,0	9,4
Produtos da cana-de-açúcar	32,8	38,4	17,1
Energia hidráulica e eletricidade	33,4	35,3	5,6
Lenha e carvão vegetal	28,6	29,9	4,6
Outras renováveis	6,7	7,5	11,8
TOTAL	225,9	239,4	5,9

Em 2009, os produtos da cana-de-açúcar, que são a maior fonte de energia renovável, representaram 18,1% da oferta energética brasileira. O comparativo percentual, entre as fontes brasileiras de energia neste ano, está ilustrado na Figura 3.1.

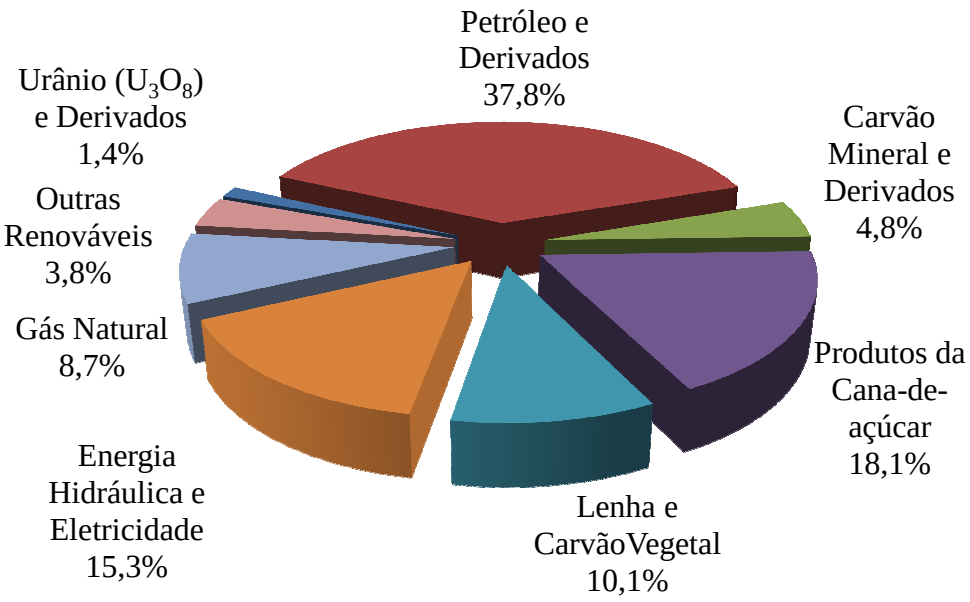

Figura 3.1 – Distribuição percentual da oferta energética brasileira em 2009 (BRASIL, 2010).

A participação da cana-de-açúcar na matriz energética brasileira tem merecido destaque, nas últimas quatro décadas. Este progresso pode ser observado na Figura 3.2, que ilustra a evolução da oferta interna de energia no Brasil, em tonelada equivalente de petróleo (BRASIL, 2010). Atualmente os produtos derivados da cana-de-açúcar estão atrás apenas do Petróleo e derivados na produção de energia.

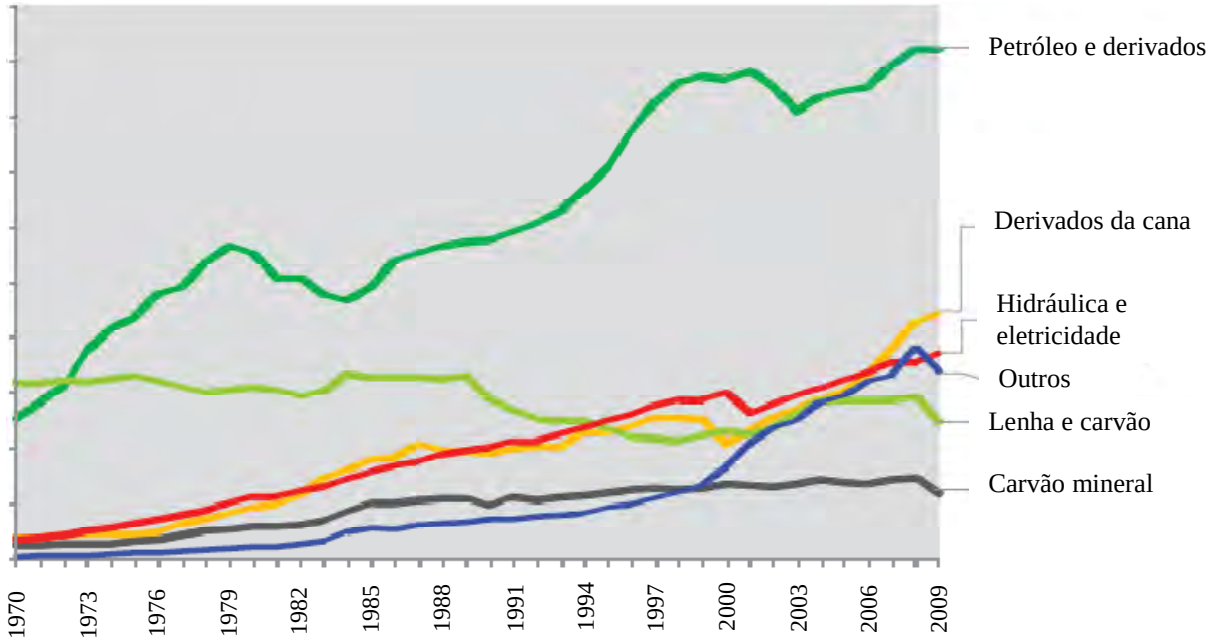

Figura 3.2 – Evolução da oferta interna de energia no Brasil, em tep (BRASIL, 2010).

3.2 CULTIVO DE CANA

A cana-de-açúcar foi trazida no ano de 1532 por Martim Afonso de Sousa. Nas últimas décadas, este produto passou a ter uma maior importância econômica. Sua produção inicial ocorreu no pólo localizado na Zona da Mata nordestina, depois se expandiu para região Sudeste, principalmente no Estado de São Paulo. Do ponto de vista botânico a cana-de-açúcar (*Saccharum spp.*) é considerada uma planta alógama (fecundação cruzada), pertencente à família *Gramineae*, classe das monocotiledôneas. Entre suas principais características, está o fato de apresentar flores pequenas, reunidas em típicas inflorescências (DANIELS; ROACH, 1987). A cana-de-açúcar possui grande adaptação a regiões de climas tropicais e subtropicais, possui ainda grande facilidade de cultivo em diferentes tipos de solos e utiliza entre 2% e 3% da radiação solar incidente na produção de biomassa vegetal (LORA et al., 2001). A composição química típica da cana-de-açúcar é apresentada na Tabela 3.2.

Tabela 3.2 – Composição química e principais sólidos solúveis da cana-de-açúcar, COPERSUGAR (2009).

Composição	Teor médio (%)
Água	65 - 75
Açúcares	11 - 18
Fibras	8 - 14
Sólidos solúveis	12 - 23
Sacarose	70 - 91
Glicose	2 - 4
Frutose	2 - 4
Sais	3,0 - 5,0
de ácidos inorgânicos	1,5 - 4,5
de ácidos orgânicos	1,0 - 3,0
Proteínas	0,5 - 0,6
Amido	0,001 - 0,05
Gomas	0,3 - 0,6
Ceras e graxas	0,05 - 0,15

Na região centro-sul os meses de janeiro a março são ideais para o plantio, pois o clima quente e úmido favorece a germinação, perfilhamento e desenvolvimento vegetativo. Em seguida o clima frio e seco, promove a maturação e consequente acúmulo de sacarose. Para a região Norte-Nordeste, os meses ideais são de maio à junho. A cana de açúcar conta com variadas formas de utilização, podendo ser empregada como alimentação animal, forragem, ou como matéria-prima para a fabricação de açúcar, álcool, rapadura, melado e aguardente. Entretanto, o destino mais visado é a fabricação de açúcar e álcool. A cana-de-açúcar é a matéria-prima que possibilita a produção de açúcar e álcool com os menores custos (BRASIL, 2008).

O Estado de São Paulo é responsável por 62% da plantação e cultivo da cana-de-açúcar, representando um total de 64% do álcool e 56% do açúcar produzidos no Brasil. A área de cana-de-açúcar cultivada em São Paulo atinge 2.300.000 ha, sendo que no Brasil a área plantada de 4.887.647 hectares e produtividade média de 70 t/ha (SANTOS et al., 2006). A colheita da cana-de-açúcar é realizada basicamente de forma manual, pois apenas 30% da colheita é mecanizada (ALVES; ANDRADE; CINTRA, 2004).

No ano de 2009 a produção de álcool pelo estado de Goiás cresceu 26,7 %, atingindo 2.122 mil m³, enquanto a produção nacional de álcool decresceu 3,8% no mesmo período. Na safra 2008/2009 foram colhidas aproximadamente 29,5 milhões de toneladas de cana-de-açúcar no estado de Goiás, indicando um expressivo aumento de 40% em relação à safra anterior do estado que é o quarto maior produtor de cana-de-açúcar (UNICA, 2009).

Segundo Macedo (2009), nas usinas de açúcar, o mel resultante de produção de açúcar é utilizado para fabricar o álcool. Deste modo, a maioria das usinas de açúcar possui destilarias anexas para a fabricação de álcool etílico.

O balanço das emissões de CO_2 produzidas por meio da co-geração com bagaço de cana-de-açúcar é insignificante, uma vez que a fotossíntese compensa a grande liberação de carbono na forma de CO_2 da biomassa queimada, no ciclo seguinte da cultura da cana. De acordo com a Tabela 3.3, a queima do bagaço gera menos que 10% de gás carbônico do que a combustão do óleo combustível (FIESP/CIESP, 2001).

Tabela 3.3 – Emissões de CO_2 na geração de energia elétrica com diferentes combustíveis (FIESP/CIESP, 2001), com adaptações.

Tipo de combustível	Emissão (kg CO_2/kWh)	Condição de queima
Cana-de-açúcar	0,057 – 0,11	Ciclo completo incluindo energia indireta dos equipamentos e insumos
Madeira	0,047	Ciclo completo incluindo energia indireta dos equipamentos e insumos
Óleo combustível	0,87	Somente queima combustível
Gás natural	0,38	Somente queima combustível

3.3 MERCADO DO ETANOL

O rápido aumento de veículos bicombustíveis, movidos a álcool e/ou gasolina, fomentou a recente expansão da indústria brasileira de cana-de-açúcar. O Brasil é o maior produtor e exportador de açúcar e etanol do mundo. A principal destinação do etanol produzido é como combustível para transporte de carros de passeio. Segundo dados da (UNICA, 2010) na safra 2008/2009, o Brasil produziu 35,9 bilhões de litros de etanol na forma anidro e hidratado. Aproximadamente 91% da produção nacional de etanol estão concentradas no Centro Sul do país, sendo que a maior parte desta produção é proveniente do estado de São Paulo.

No Brasil a cana-de-açúcar é produzida principalmente nas regiões Centro-Sul e Nordeste. As áreas de plantações e usinas produtoras de açúcar, etanol e bioeletricidade, podem ser observadas nas partes em vermelho da Figura 3.3, segundo dados oficiais do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE), Universidade Estadual de Campinas (UNICAMP) e do Centro de Tecnologia Canavieira (CTC) (UNICA, 2010).

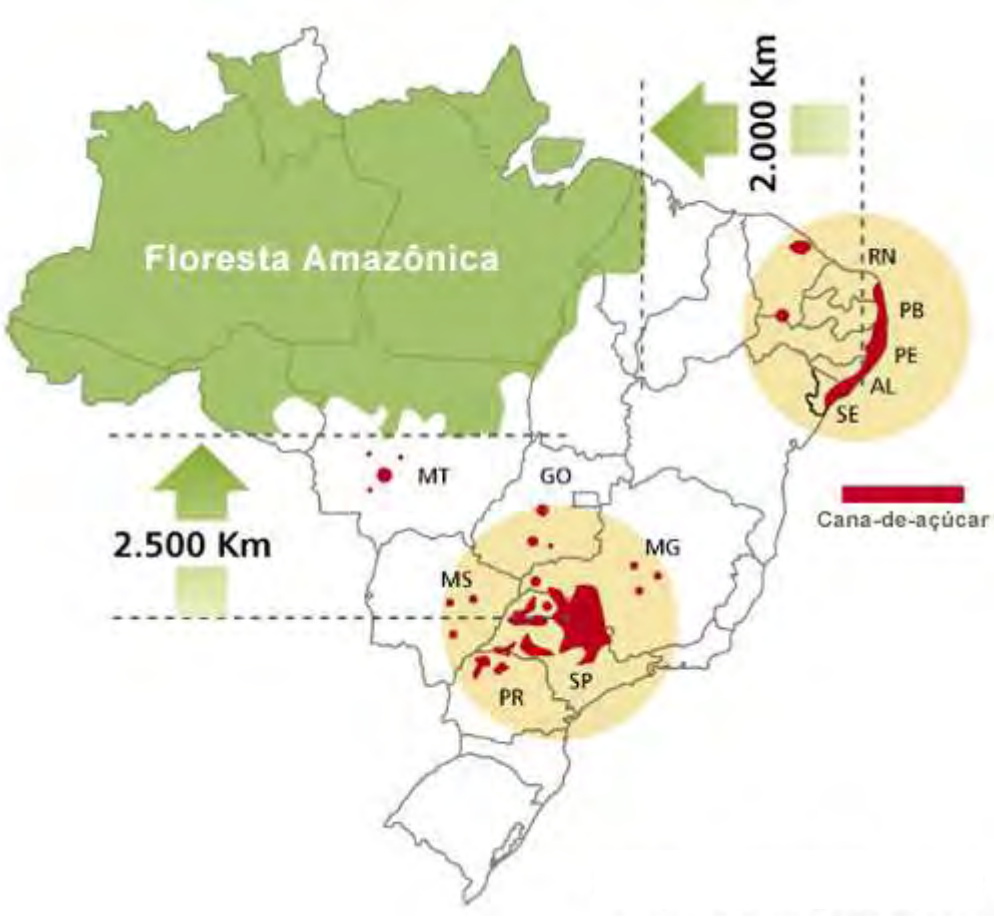

Figura 3.3 – Mapa de produção do setor sucroalcooleiro no Brasil (UNICA, 2010).

O petróleo é utilizado a mais de 50 anos como a principal fonte de energia não-renovável em nosso planeta. A busca por fontes renováveis de energia e combustíveis surgiu como consequência dos altos preços do petróleo e o aumento em sua demanda em diversos setores da indústria. Atualmente, apenas 2% da energia utilizada no mundo são provenientes de biocombustíveis e espera-se que até o ano de 2020 esse percentual suba para 30%. No ano de 2009 a produção mundial de etanol alcançou cerca de 56 bilhões de litros, sendo o Brasil e os Estados Unidos responsáveis por 70% desse total (MARTINES-FILHO; BURNQUIST; VIAN, 2006).

3.4 A ORIGEM DA CINZA DO BAGAÇO DA CANA-DE-AÇÚCAR

A colheita da cana-de-açúcar ocorre de duas formas: manual e mecanizada. A queima da lavoura, para eliminação da palha, é dispensada para a colheita mecanizada. No processo manual a cana é colhida inteira, sendo necessário passar por um dispositivo de picotagem antes do processo de limpeza da cana (Figura 3.4a). Já com a cana colhida de forma mecanizada não necessita de ser picotada indo então direto para o processo de lavagem que utiliza água em circuito fechado. A seguir a cana é desfibrilada, para melhor aproveitamento do caldo nos próximos cinco ternos de moagem. O bagaço da cana-de-açúcar, proveniente da moagem da cana, é utilizado como combustível para as caldeiras nas caldeiras de usinas sucroalcooleiras (JALLES MACHADO, 2009). A queima do bagaço gera como resíduo a CBC residual, que normalmente é utilizado nas lavouras de cana, conforme a Figura 3.4 b. O processo da produção da CBC com colheita manual está resumido na Figura 3.5.

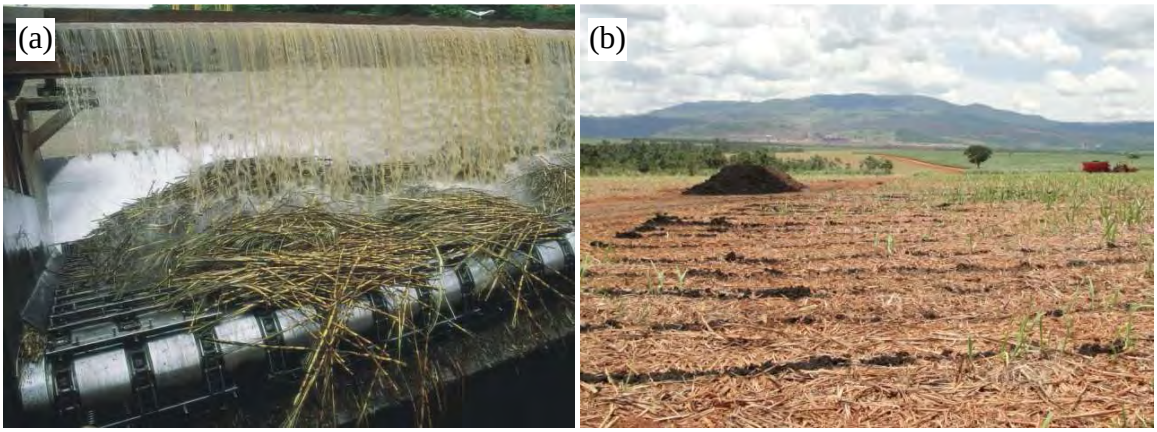

Figura 3.4 – (a) Processo de limpeza da cana; (b) Utilização da CBC na lavoura.

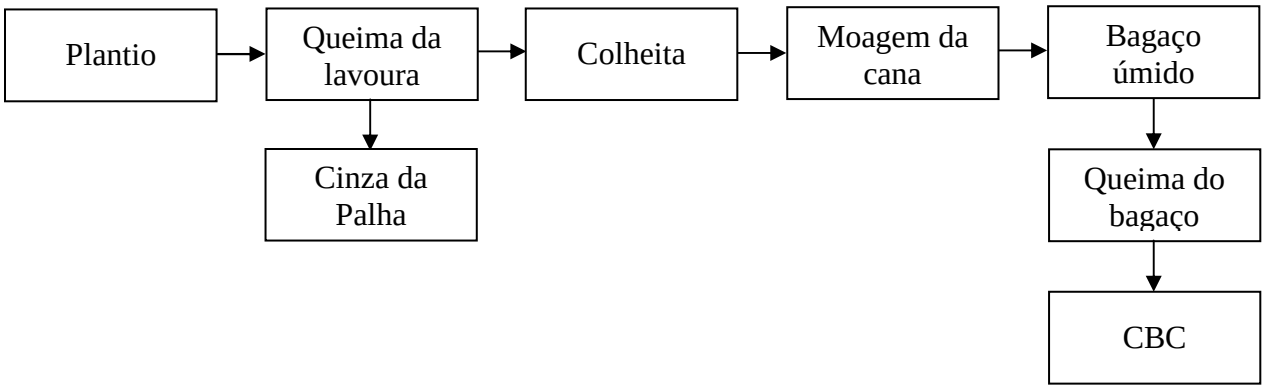

Figura 3.5 – Fluxograma resumido da produção de CBC (FREITAS, 2005).

A combustão do bagaço é realizada de forma muito rápida, pois a maior parte do bagaço é queimada ainda durante a queda deste combustível no interior da caldeira em temperaturas normalmente superiores a 600ºC. Em torno de 80% da massa da cinza é expelida junto com os gases da combustão sendo retirada destes por meio de um sistema de lavadores de gases, presentes nas chaminés. O restante da CBC fica depositado no fundo da caldeira até ser removido periodicamente por um sistema de fundo móvel (basculante). Em usinas mais modernas e preocupadas com a poluição desta queima, existe um dispositivo denominado *Scruber* capaz de lavar os gases da combustão do bagaço da cana, podendo então retirar a cinza presente na fumaça que de outro modo seria lançada ao ar (JALLES MACHADO, 2009).

Segundo Jalles Machado (2009), a queima do bagaço da cana-de-açúcar, no processo de co-geração, produz energia térmica, mecânica e elétrica. Este processo possibilita a usina produzir 40 Mega Watts de energia elétrica o que seria suficiente para abastecer uma cidade com 150.000 habitantes. A CBC que sai da usina encontra-se úmida devido o processo de lavagem de gases que retira a CBC do ar emanado pelas chaminés. Além disso, o transporte da cinza é realizado pela água por meio de calhas até o ponto de lançamento (em caminhões). Antes deste lançamento o material (CBC e água) passa por uma peneira rotativa que retira todo o excesso de água que volta para compor um circuito fechado. Este material é comumente depositado próximo da usina onde permanece até a sua destinação final nas lavouras de cana.

A utilização da CBC como “adubo” sem estudo e acompanhamento técnico aprofundado pode ser nocivo ao solo e ao meio ambiente um vez que se trata de um resíduo de difícil degradação, com poucos nutrientes minerais e que apresenta em sua composição química metais pesados. A constituição química da CBC residual pode apresentar teores de

carbono variados decorrentes das condições em que o bagaço da cana é queimado. Fatores como a temperatura de queima e o tempo de permanência do bagaço a ser queimado, até sua retirada da caldeira na forma de cinza, determinam o teor de carbono remanesceste na CBC. Este teor de carbono pode ser medido por meio do ensaio de perda ao fogo, semelhante ao ensaio realizado com o cimento, segundo a norma NBR NM 18 (ABNT, 2004a).

3.5 A CINZA DO BAGAÇO DA CANA-DE-AÇÚCAR COMO ADIÇÃO MINERAL

A CBC é um subproduto que atualmente não conta com uma destinação correta. Porém a sua adição ao concreto, substituindo parte do cimento empregado, pode manter as características principais do concreto e representar ganhos ambientais com a redução da emissão de CO_2. A CBC residual não requer um tratamento complexo para substituir parcialmente o cimento. Nesta pesquisa a preparação da CBC residual contou principalmente com um peneiramento para eliminar alguns resíduos que não sofreram uma combustão completa e também o refinamento dos grãos realizado que pode ser realizado, por exemplo, por um moinho rotativo de esferas, com a finalidade de aumentar sua superfície específica e consequentemente a atividade pozolânica da adição mineral (ALVES; GOULART, 1981).

BORLINI et al. (2006) utilizaram uma CBC de Campos dos Goytacazes no Norte do Estado do Rio de Janeiro, gerada na calcinação do bagaço em caldeiras de uma usina sucroalcooleira, como matéria prima na fabricação de telhas cerâmicas. A CBC, com granulometria inferior a 44 µm, foi misturada com uma argila cerâmica industrial, da mesma localidade, utilizada na fabricação de telhas. Para o teor de 10% de substituição foi observada uma redução no valor da absorção de água, sem diferenças significativas nas propriedades mecânicas da mistura.

Uma amostra de cinza do bagaço, selecionada e produzida sob condições de queima controladas em laboratório, foi caracterizada por Cordeiro et al. (2008). Os ensaios utilizados foram: fluorescência de raios X, difração de raios X, ressonância magnética nuclear (29Si), microscopia eletrônica de varredura, análises térmicas, granulometria a laser, superfície específica, massa específica e atividade pozolânica (índice de atividade pozolânica com cimento Portland e método de Chapelle modificado). A cinza do bagaço de cana-de-açúcar apresentou, segundo conclusões, como matéria-prima com potencial para a produção de pozolana.

Segundo Cordeiro et al. (2008), vários estudos mostraram que o uso de CBC em substituição parcial ao cimento Portland pode melhorar algumas características dos aglomerantes. Porém, não era evidente se estas melhorias são associadas aos efeitos físicos ou químicos. Inicialmente, o tamanho da partícula de CBC influencia em relação ao efeito de empacotamento. Para tanto, foi analisada a atividade pozolânica da CBC e a resistência à compressão de argamassas. Os resultados indicaram que a CBC pode ser classificada como um material pozolânico, mas que sua atividade depende significativamente de seu tamanho de partícula e área superficial. Comparando a reatividade da CBC oriunda da queima do bagaço de cana-de-açúcar sob várias temperaturas, de 400ºC a 900ºC, de acordo com a Figura 3.6, conclui-se que, para uma queima mais eficiente do bagaço da cana, utilizando a atividade química pelo método Chapelle modificado, a temperatura ideal a ser adotada é de 500ºC.

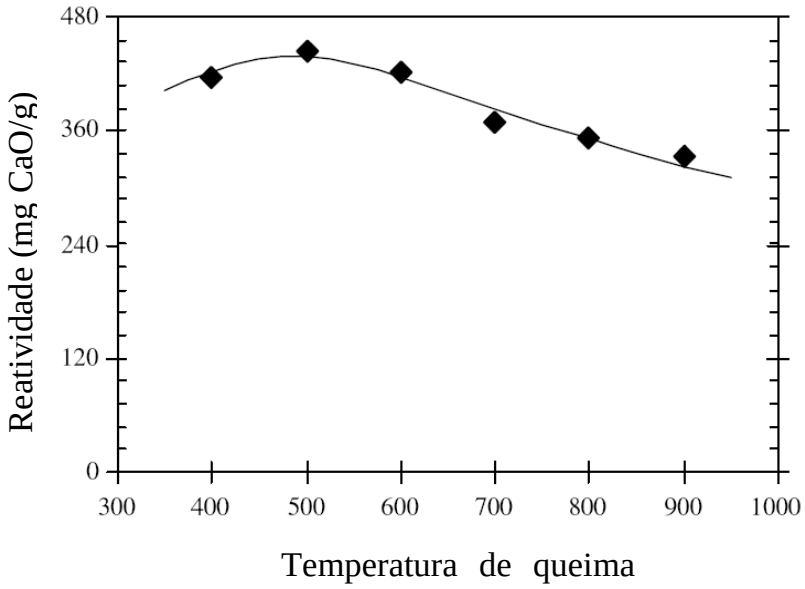

Figura 3.6 – Efeito da temperatura de queima do bagaço de cana-de-açúcar na reatividade da CBC utilizando o método de Chapelle (CORDEIRO et al., 2008).

Segundo Cordeiro (2006), as cores das Cinzas residuais variam em função do grau de calcinação a que o bagaço foi submetido no interior da caldeira, e por consequência o teor de carbono da cinza resultante desta combustão, como pode ser observado na Figura 3.7. O bagaço de cana em sua forma natural é ilustrado na Figura 3.7(a). Nas Figuras 3.7(b), 3.7(c) e 3.7(d) são exibidas cinzas com grau decrescente do teor de carbono e coloração que varia do preto ao branco, este último indicando a combustão completa do bagaço.

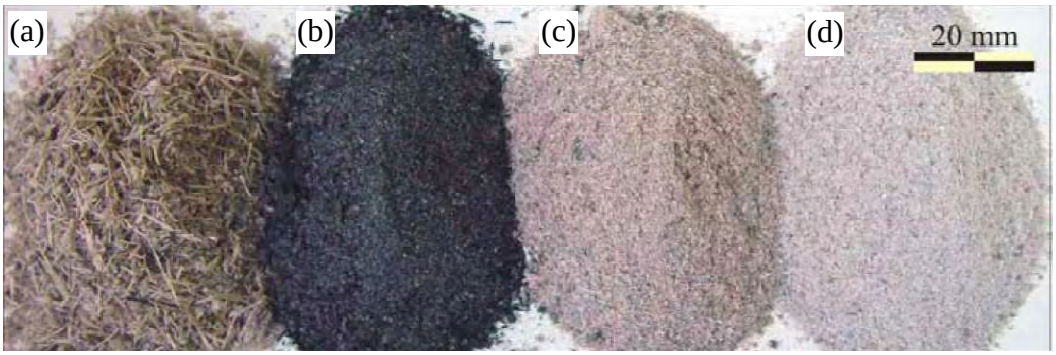

Figura 3.7 – Fibra do Bagaço de cana-de-açúcar (a), cinza escura com alto teor de carbono (b), cinza com menor teor de carbono (c) e cinza gerada após combustão completa (d). (Adaptado de CORDEIRO, 2006)

A caracterização morfológica do bagaço de cana-de-açúcar estudado por Cordeiro (2006) é ilustrada na Figura 3.8. As imagens, obtidas por microscopia eletrônica de varredura com detecção por elétrons secundários, apresentam detalhes das fibras de bagaço na Figura 3.8-b.

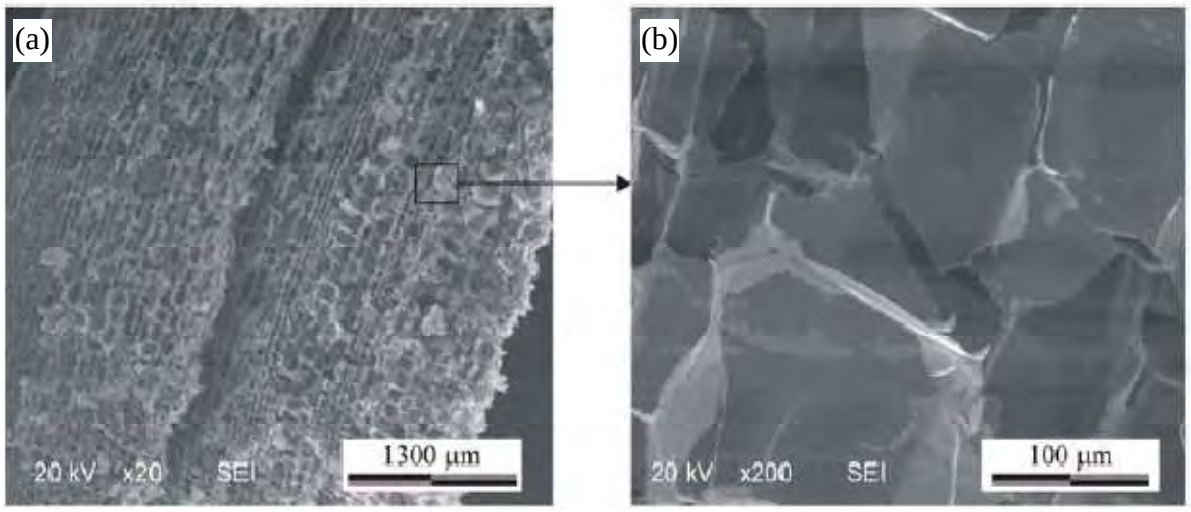

Figura 3.8 – (a) Fotomicrografia do bagaço de cana-de-açúcar ampliada 20 vezes; (b) Detalhe ampliada 200 vezes (CORDEIRO, 2006).

A morfologia da cinza residual do bagaço de cana-de-açúcar, estudada por Cordeiro (2006), é ilustrada na Figura 3.9. As imagens foram obtidas por microscopia eletrônica de varredura com detecção por elétrons retroespalhados com aumentos de 200, 500, 150 e 1.000 vezes, respectivamente.

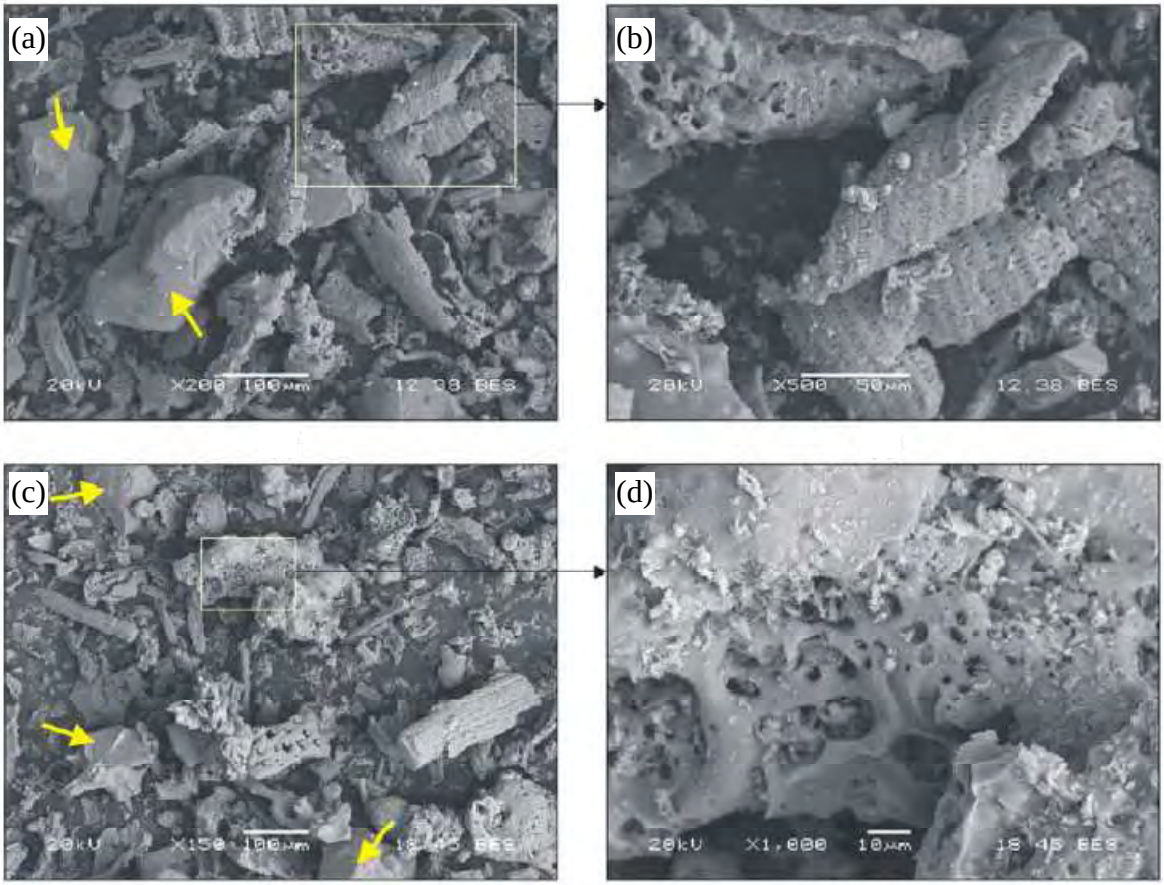

Figura 3.9 – Morfologia da cinza residual do bagaço de cana-de-açúcar. [(a) e (c)]; detalhe da estrutura altamente porosa da cinza [(b) e (d)]. As setas em amarelo indicam a presença de contaminação por partículas de quartzo (CORDEIRO, 2006).

A caracterização da CBC residual estudada por Cordeiro (2006) contou também com um ensaio de difratograma de Raios-X. O resultado deste ensaio está ilustrado na Figura 3.10. As propriedades desta CBC residual e também da CBC ultrafina estão representadas na Tabela 3.4. Dentre os ensaios CBC residual e a CBC ultrafina, aquele que mais chama atenção é o índice de atividade pozolânica que aumentou de 49% para 100% com a redução do tamanho das partículas.

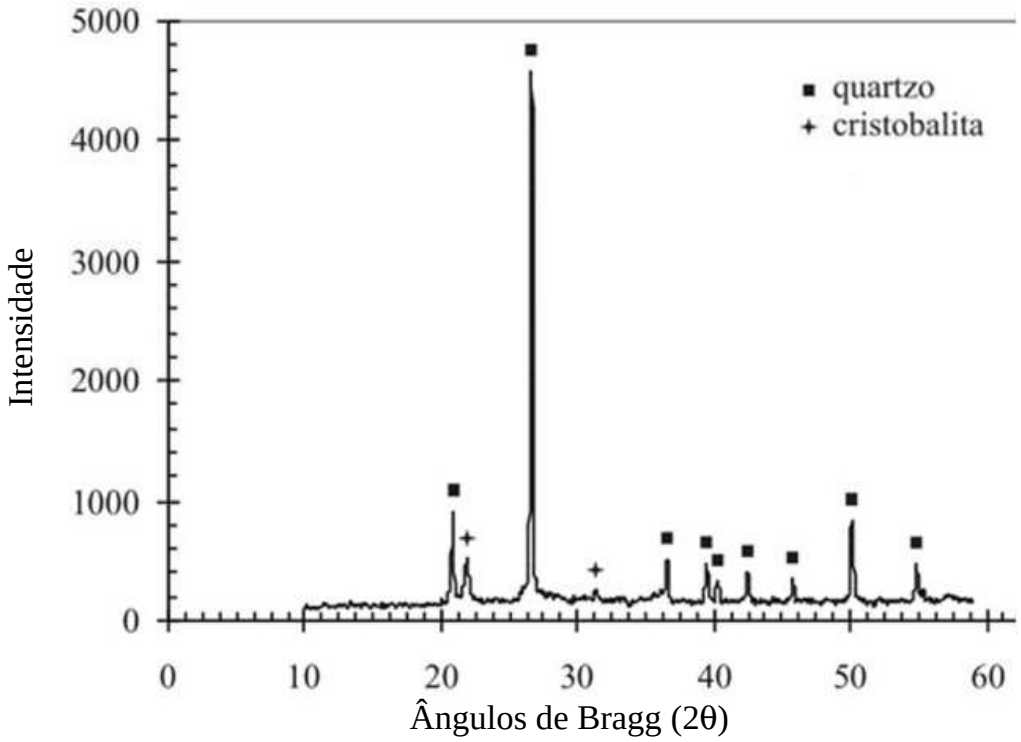

Figura 3.10 – Difratograma de Raios-X da CBC Residual (CORDEIRO, 2006).

Tabela 3.4 – Propriedades da CBC residual e ultrafina (CORDEIRO, 2006).

COMPOSTO QUÍMICO	Cinza residual do bagaço	Cinza ultrafina do bagaço
D80 (µm)	161,10	8,48
Percentual maior que 45 µm	65,10	0
Sup. específica, Blaine (m^2/kg)	215	893
Massa específica (kg/m^3)	2530	2530
Índice de atividade pozolânica (%)	49	100
Índice de trabalho (kWh/t)	36,74	36,74
SiO_2 (%)	78,34	78,34
Perda ao fogo (%)	0,42	0,42

A CBC, pesquisada por Paula (2006), teve como origem o bagaço da cana-de-açúcar coletado em uma Usina do município de Urucânia - MG. Primeiramente o bagaço foi incinerado em mufla a 700ºC, por 3 horas, seguido de resfriamento natural. A análise de difração de Raio-X da CBC, que foi moída em moinho de bolas por 11 horas, está representada na Figura 3.11.

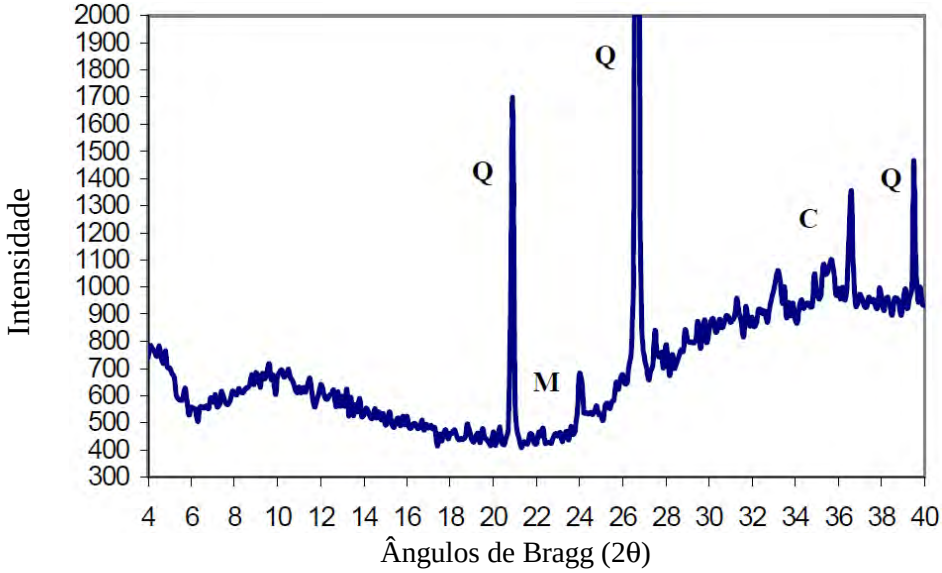

Figura 3.11 – Análise de difração de Raio-X da CBC (PAULA, 2006).

A fase amorfa da CBC estuda por Paula (2006) é evidenciada pela ausência de picos na região onde os ângulos de Bragg variam de 6º a 18º e acima de 24º. A estrutura da CBC em ângulos iguais a 21º e 27º demonstram as fases cristalinas da sílica, (C) cristobalita, (Q) quartzo e (M) muscovita.

Segundo Cordeiro (2006), a CBC apresenta um teor em massa de dióxido de silício, em geral, acima de 60%. O Silício absorvido do solo é depositado na parede externa das células da epiderme como sílica gel. Outra fonte possível de sílica é a areia, não totalmente removida no processo de lavagem da cana. Diante deste predomínio do dióxido de silício, segundo Macedo (2009), é relevante uma comparação na composição química das CBC quanto a existência de uma homogeneidade no teor de SiO_2.

Tabela 3.1 – Teor de SiO_2 das CBC's, por vários autores (MACEDO, 2009) adaptado.

Autor	Ano	Local	País	SiO_2 (%)
Baguant	1995	Port Louis	Mauritius	73,10
Martirena-Hernandez et al	1998	Villa Clara	Cuba	72,74
Singh; Singh; Rai	2000	Captainganj, D. Kushinagar	Índia	63,16
Paya et al	2002	Valle del Cauca	Colômbia	59,87
Zardo et al	2004	Araras, SP	Brasil	77,30
Freitas	2005	COAGRO Goytacazes, RJ	Brasil	65,70
Freitas	2005	Paraíso Goytacazes, RJ	Brasil	83,10
Paula	2006	Uracania, MG	Brasil	83,71
Cordeiro	2006	Sao Joao da Barra, RJ	Brasil	78,34
Borlini et al	2006	Campos dos Goytacazes, RJ	Brasil	77,50
Mu'Azu	2007	-	Nigéria	57,95
Ganesan; Rajagopal; Thagavel	2007	Aranthangi, TamilNadu	Índia	64,15
Santos; Formagini	2008	Sidrolandia, MS	Brasil	83,80
Macedo	2009	Pereira Barretos - SP	Brasil	62,34
Lima et al.	2010	Barra Bonita - SP	Brasil	62,70

4 ENSAIOS RELATIVOS À DURABILIDADE NO CONCRETO

A durabilidade do concreto pode ser determinada por diversos ensaios, porém, para o presente estudo foram adotados ensaios relativos à resistência do concreto, ao transporte de água e ao avanço da frente de carbonatação. A escolha destes ensaios se justificou pela importância dos mesmos quanto ao comportamento do concreto com a utilização de adições minerais em substituição parcial do cimento Portland utilizado. O transporte de água foi determinado por meio dos ensaios de permeabilidade do concreto, absorção capilar e absorção por imersão. O avanço da carbonatação foi determinado para a carbonatação natural e carbonatação acelerada com a utilização, neste caso, de câmara com 100% de CO_2.

4.1 ABSORÇÃO

De acordo com Lara (2003), a absorção por capilaridade é entendida como o transporte do líquido decorrente da tensão superficial que atua nos poros do concreto. As características do sólido, tais como distribuição, diâmetro e continuidade dos poros, influenciam diretamente neste fenômeno. Também exercem influência sobre a absorção capilar, a viscosidade, a densidade e a tensão superficial do líquido. O líquido penetra através do capilar, segundo Figueiredo (1994), devido à força de sucção produzida pela tensão superficial sobre o menisco localizado no interior do poro.

A absorção tem forte influência na durabilidade do concreto, segundo Araújo (2004), uma vez que existem muitas estruturas de concreto que permanecem expostas às intempéries. Para Monteiro (2002), a influência da estrutura dos poros é determinante na absorção capilar, tanto no volume de água absorvido, quanto na velocidade de absorção, bem como na altura de sucção. Quanto menores os diâmetros dos poros, em teoria, maiores são as pressões capilares e maior é a altura. Em contra partida, com poros mais largos têm-se alturas menores, porém volumes absorvidos maiores.

De acordo com Figueiredo (1994), o líquido penetra através do capilar por meio da força de sucção produzida pela tensão superficial sobre o menisco situado no interior do poro. A ascensão capilar pode ser modelada de acordo com a Lei de JURIN, expressa pela Equação (4.1).

$$h = \frac{2 \times \sigma}{r \times \nu} \qquad \text{Eq. 4.1}$$

Onde:

h = altura de sucção (m);

σ = tensão superficial da água (75×10^{-4} kg/m);

r = raio de capilar (m);

ν = massa específica da água (1 kg/m³).

4.2 PERMEABILIDADE

O termo permeabilidade é conhecido como a facilidade de um fluido passar por um material sólido. A permeabilidade do concreto depende da distribuição e do tamanho dos poros da pasta de cimento.

Segundo Mehta e Monteiro (2008), o critério mais adequado para avaliar uma estrutura porosa é a investigação da distribuição de tamanho dos poros. De acordo com Rêgo (2001) a utilização de técnicas de introdução de mercúrio possibilita demonstrar que incorporações como a escória de alto forno empregada na pasta de cimento colaboram na transformação dos poros grandes em poros menores na pasta, o que diminui a permeabilidade do concreto comprovado pelos autores (REGOURD, 1980; MANMOHAN; MEHTA, 1981).

A divisão dos poros proposta por Powers (1958) apresenta a pasta hidratada com dois tipos de poros. Poros capilares e poros gel. Para Taylor (1997) - IUPAC (International Union of Pure and Applied Chemistry) os poros na pasta hidratada podem ser divididos de acordo com suas dimensões em:

Macroporo:	Raio maior que 50 nm;
Mesoporo:	Raio entre 2,0 nm e 50 nm;
Microporos:	Raio menor que 2,0 nm.

Os mecanismos que influenciam as propriedades do concreto no estado fresco e endurecido, com a utilização de adições minerais, podem variar mais em função do tamanho, forma e textura das partículas do que de sua composição química. A demanda de água e trabalhabilidade, por exemplo, são controladas pela distribuição do tamanho das partículas e pela textura superficial dos grãos. As propriedades cimentícias e pozolânicas conduzem o desenvolvimento da resistência e da permeabilidade do concreto endurecido, sendo controladas pelas características mineralógicas, áreas superficiais e pelo tamanho das partículas das adições minerais (RÊGO, 2001).

Os poros com diâmetro de 120 nm ou 160 nm, ou superiores, são os mais importantes para a permeabilidade, devendo estes, ainda, ser contínuos. Os poros presentes nos agregados não influenciam no aumento da permeabilidade do concreto, uma vez que estão envolvidos pela pasta de cimento e de forma não contínua. Os poros formados pelas bolhas de ar incorporado igualmente não contribuem com o aumento da permeabilidade do concreto (NEVILLE, 1997).

4.3 CARBONATAÇÃO

Segundo Figueiredo (1994), a exposição do concreto a soluções ácidas ricas em CO_2 e SO_3 provoca um processo de neutralização do concreto, com consequente redução do pH. Este efeito é conhecido como carbonatação devido à predominância do CO_2 na reação.

Com a redução do hidróxido de cálcio e de outros hidróxidos, o pH do concreto é então reduzido a teores inferiores a nove. Estas reações podem ser observadas na Equação 4.2, descrita abaixo (FIGUEIREDO, 2005).

$$Ca(OH)_2 + CO_2 \rightarrow CaCO_3 + H_2O$$
$$Na, KOH + CO_2 \rightarrow Na_2, K_2CO_3 + H_2O \qquad \text{Eq. 4.2}$$

Segundo Araújo (2004), a corrosão das armaduras concentra a maior parte dos estudos sobre as manifestações patológicas em estruturas de concreto armado, pois além de ser um dos efeitos mais incidentes, tem forte impacto econômico, técnico e social. Os elevados custos para a recuperação de estruturas e os riscos estruturais gerado pela corrosão, despertam o interesse de pesquisadores sobre as formas de prevenção e mitigação deste fenômeno.

A deterioração química, os ninhos de concretagem e as deformações excessivas, quando não tratados devidamente, podem reduzir a proteção que o concreto, normalmente, confere à armadura contra o efeito da corrosão das armaduras. Na Figura 4.1, a corrosão das armaduras encontra-se entre as manifestações patológicas de maior incidência, juntamente com as manchas superficiais, as fissuras e os ninhos de concretagem, exceto esta última manifestação, as demais podem também ser devido aos produtos de corrosão formados durante a oxidação da armadura (ARAÚJO, 2004).

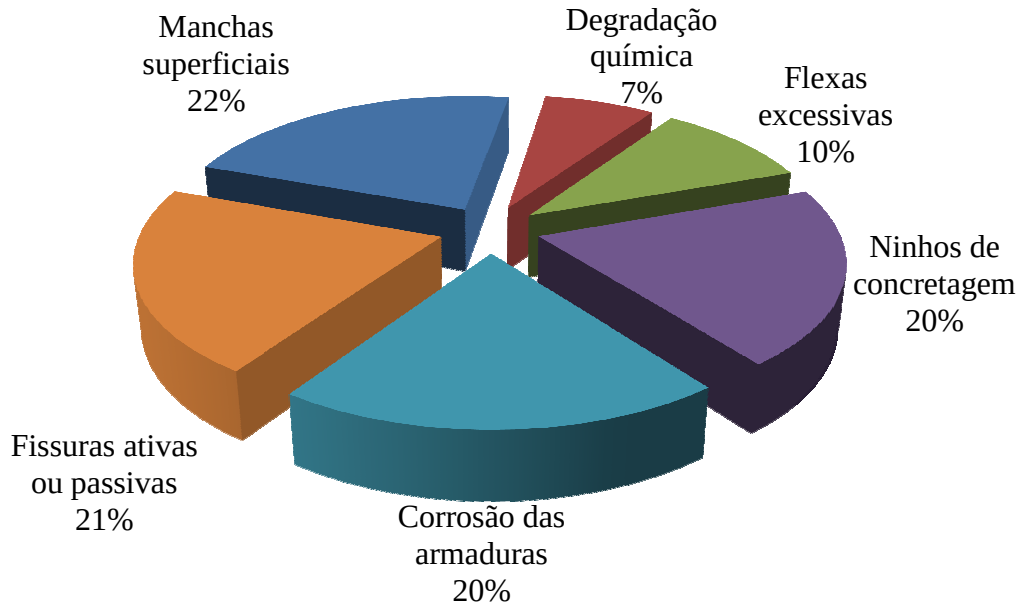

Figura 4.1 – Distribuição relativa à incidência das manifestações patológicas em estruturas de concreto armado (HELENE; FIGUEIREDO, 2003) adaptada.

A corrosão geralmente se inicia quando a armadura, imersa no concreto, é despassivada, devido a processos como a carbonatação e a penetração de cloretos através da rede de poros existente no concreto. O concreto apresenta vazios e micro-fissuras mesmo quando bem dosado e executado. Estes vazios podem aumentar a suscetibilidade à penetração de líquidos e gases danosos a estrutura bem como reduzir sua resistência à compressão. Segundo Neville (1997) a carbonatação do concreto é um fenômeno natural que conta com a existência de gás carbônico na atmosfera.

A penetração de CO_2 no concreto é favorecida por mecanismos de difusão por meio de diferenças de concentração entre o concreto e o meio externo. Portanto, a concentração de CO_2 favorece o aumento da taxa de carbonatação (KAZMIERCZAK; HELENE, 1993).

Um esquema do mecanismo de corrosão na armadura presente em um concreto, ilustrado na Figura 4.2, foi proposto pelo CEB/BI 152 (1984), onde a armadura funciona

como um eletrodo misto, na qual ocorrem as reações anódicas e catódicas, e a solução contida nos poros do concreto é o eletrólito (FIGUEIREDO, 1994).

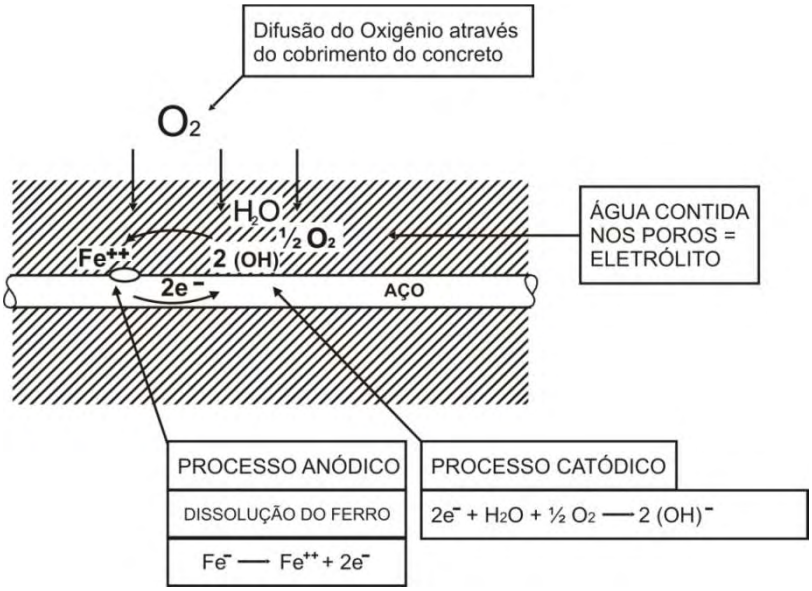

Figura 4.2 – Célula simplificada de corrosão (CEB/BI 152, 1984)

A velocidade da carbonatação no concreto depende de fatores, tais como a concentração de CO_2 no ambiente, consumo de cimento do concreto, uma vez que o cimento é alcalino (alto valor de pH) e reduz o efeito da carbonatação. A umidade relativa do ambiente tem uma influência direta nesta velocidade, pois para umidades entre 50% e 80% a porcentagem carbonatada tende a ser máxima, conforme a Figura 4.3 de Verbeck (1950) apud Figueiredo (2005).

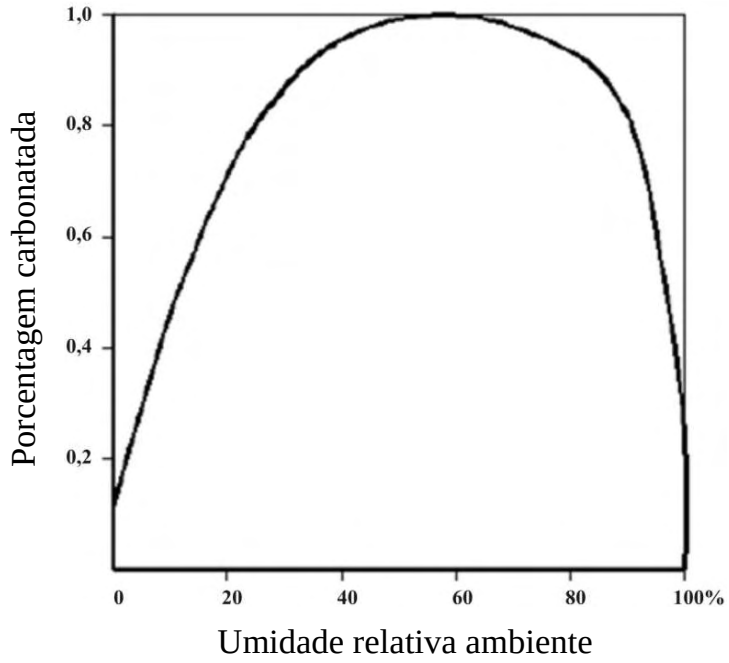

Figura 4.3 – Porcentagem carbonatada em função da umidade relativa ambiente (VERBECK, 1950 apud FIGUEIREDO, 2005).

Segundo Araújo (2004), os três principais elementos que podem iniciar a corrosão são a água pura que pode conter ou não íons agressivos, o dióxido de carbono e o oxigênio. Estes elementos podem penetrar no interior do concreto por meio das micro-fissuras ou por poros na matriz de cimento. Se a porosidade for grande e os poros estiverem interligados, estes vão contribuir para a movimentação dos fluidos no interior do concreto, caracterizando um concreto bastante permeável. Por outro lado, se os poros forem descontínuos, este concreto será classificado apenas como de alta porosidade, porém de baixa permeabilidade.

4.3.1 Determinação da profundidade de carbonatação

A aspersão de indicadores de pH é o processo mais comum para a visualização do avanço da frente de carbonatação, tendo como vantagens a praticidade e o baixo custo. Os indicadores de pH, mais utilizados, para o estudo da carbonatação do concreto, são a base de Fenolftaleína, timolftaleína e amarelo de alizarina.

De acordo com RILEM (1988), estes indicadores tem intervalos de mudança de cor nas faixas de pH: 8,3-10,0; 9,3-10,5 e 10,1-12,0, respectivamente. A solução de fenolftaleína é preparada dissolvendo 10g deste reagente em 700 ml de etanol e 300ml de água destilada. Quando a solução de fenolftaleína entra em contato com uma região alcalina sua cor apresenta-se violeta, enquanto as regiões menos alcalinas se apresentam se incolores (Figura 4.4).

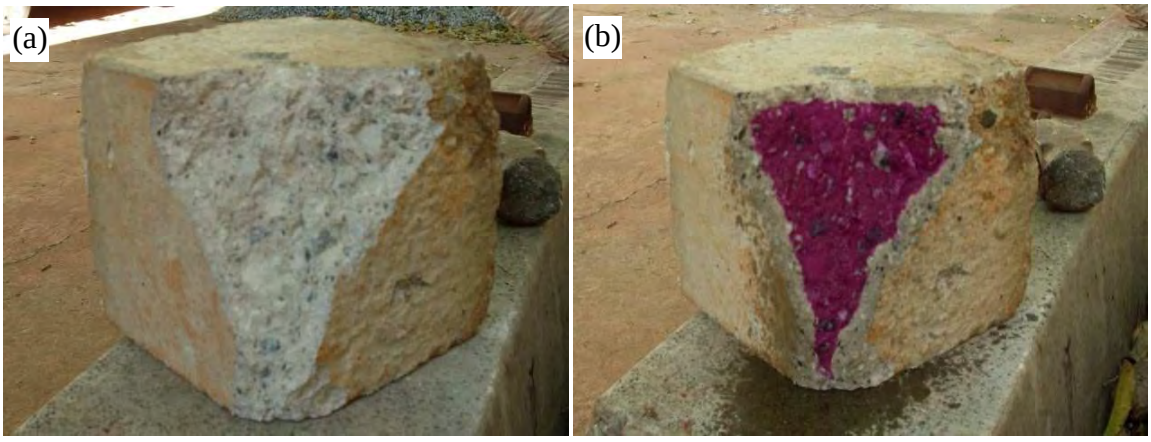

Figura 4.4 – Aspersão de solução de fenolftaleína em região recém fraturada do concreto.

A mudança de cor é facilmente observada quando uma delas é incolor. Por essa razão, é interessante o uso da fenolftaleína, que varia de róseo/violeta a incolor. A fórmula estrutural fenolftaleína é observada na Figura 4.5 (OSAWA et al., 2006).

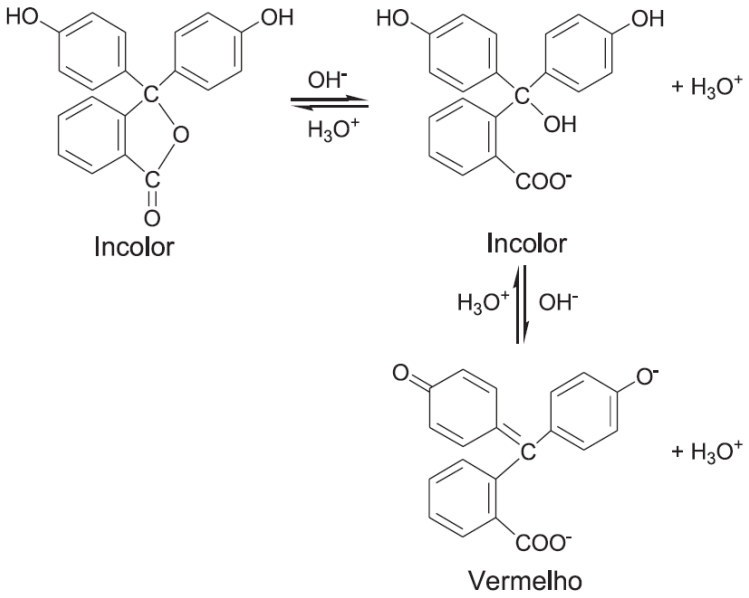

Figura 4.5 – Fórmula estrutural da fenolftaleína (OSAWA et al., 2006).

Vários fatores podem contribuir para maior incidência da carbonatação no concreto. O avanço da frente de carbonatação pode decorrer de condições de exposição ou características do concreto, conforme os parâmetros demonstrados na Tabela 4.1.

Tabela 4.1 – Fatores que influenciam a velocidade do avanço da frente de carbonatação (KAZMIERCZAK, 1995).

	Fatores Condicionantes	**Características influenciadas**
Condições de exposição	Concentração de CO_2	Mecanismo físico-químico Velocidade de carbonatação
	Umidade relativa do ambiente	Grau de saturação dos poros Velocidade de carbonatação
	Temperatura	Velocidade de carbonatação
Característica do concreto	Composição química do cimento: • Características do clínquer • Teor de adições	• Porosidade da pasta carbonatada • Reserva alcalina
	Traço	• Porosidade
	Qualidade da execução: • Defeitos • Cuidados com a cura	• Porosidade • Grau de hidratação

5 PROGRAMA EXPERIMENTAL, MATERIAL E MÉTODOS

A fim de estudar o comportamento da cinza do bagaço de cana-de-açúcar (CBC) residual como adição mineral ao concreto em substituição parcial do cimento Portland, buscou-se caracterizar esta adição mineral e seu efeito em propriedades mecânicas do concreto bem como em propriedades relativas à durabilidade. Os concretos foram moldados utilizando como aglomerante simplesmente o cimento CPV-ARI (Referência) e com substituições parciais deste por 5%, 10% e 20% de CBC residual, em massa.

A metodologia experimental foi divida em quatro etapas. A primeira etapa diz respeito à caracterização dos insumos utilizados na produção de concreto e o estudo de dosagem. O comportamento do concreto no estado fresco foi caracterizado na segunda etapa. A terceira etapa avalia as propriedades mecânicas dos concretos produzidos e, finalmente, a quarta etapa trata de ensaios relativos à durabilidade dos concretos. O resumo do programa experimental e as propriedades analisadas em cada um dos ensaios estão descritos na Tabela 5.1.

Tabela 5.1 – Resumo do programa experimental.

Etapas	Material e métodos	Idade de ensaio (dias)
Caracterização dos insumos e dosagem	Cinza do bagaço da cana residual Cimento CPV ARI Aditivo superplastificante Areia de Quartzo Brita Água	Pré-mistura
Comportamento do concreto no estado fresco	Abatimento de tronco de cone Massa específica do concreto fresco Teor de ar incorporado	Pós-mistura
Avaliação das propriedades Mecânicas do concreto	Resistência à compressão axial	7, 28 e 91
	Resistência à tração por compressão diametral	28
	Módulo de Elasticidade	28
Parâmetros relativos à durabilidade do concreto	Absorção de água por capilaridade	28
	Absorção de água por imersão	28
	Índice de vazios (%)	28
	Massa específica do concreto endurecido	28
	Permeabilidade	63
	Carbonatação natural e acelerada do concreto	290

5.1 VARIÁVEIS ESTUDADAS

5.1.1 Variáveis independentes

O teor de argamassa (também conhecido por α) para todos os concretos foi definido em 51%. Para os ensaios de resistência mecânica detalhados na Tabela 5.1 (resistência à compressão axial, resistência à tração e módulo de elasticidade) as relações água/aglomerante (a/agl) adotadas foram 0,37 e 0,60. Estas relações a/agl foram também adotadas para o ensaio de carbonatação natural em ambiente de laboratório, e carbonatação acelerada, em câmara climatizada com 100% de CO_2 e umidade relativa do ar controlada em 70% ±10% e temperatura em 25ºC ±5ºC.

Os demais ensaios de durabilidade do concreto (absorção capilar e total de água após 28 dias de cura e permeabilidade aos 63 dias) foram realizados somente nos concretos com a relação a/agl de 0,60, por se tratar de uma relação a/agl alta e com resultados mais significativos, para os quais, foram esperados efeitos da adição da CBC mais facilmente quantificáveis.

5.1.2 Variáveis dependentes

Teor de substituição de cimento CPV-ARI por CBC residual nos teores de 0% (Referência), 5%, 10% e 20% em massa. Resistência à compressão axial, resistência à tração, módulo de elasticidade, absorção capilar e absorção por imersão aos 28 dias, permeabilidade após 63 dias, carbonatação natural e acelerada do concreto.

5.2 CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS E ESTUDO DE DOSAGEM

Os materiais utilizados nesta pesquisa estão listados na Tabela 5.2, onde podem ser observados os respectivos fornecedores bem como o local de recebimento de cada material.

Tabela 5.2 – Origem dos materiais utilizados.

Material	Fornecedor	Local de recebimento
CBC residual	Jalles Machado S/A	Goianésia – GO
Cimento CPV	Tocantins - Votorantim cimentos	Aparecida de Goiânia – GO
Aditivo superplastificante	Sika	Goiânia – GO
Areia de Quartzo	Comercial de Areia	Professor Jamil – GO
Brita	Pedreira Anhanguera	Caturaí – GO
Água	Saneamento de Goiás S/A	Aparecida de Goiânia – GO

5.2.1 CBC residual

A utilização da CBC residual foi precedida de algumas etapas visando a preparação desta adição mineral para sua utilização em concretos. Estas etapas são ilustradas no fluxograma da Figura 5.1.

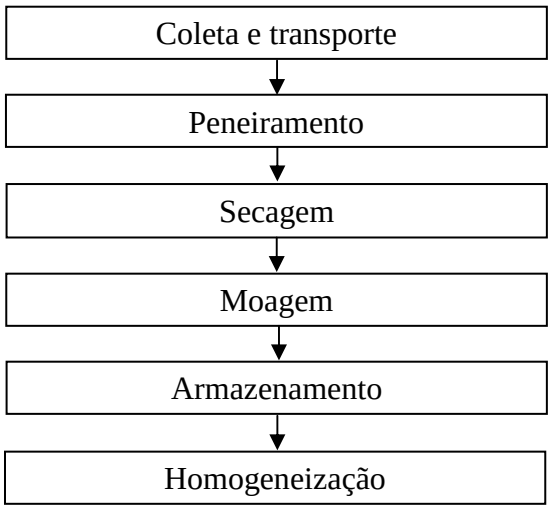

Figura 5.1 – Fluxograma da preparação da CBC.

5.2.1.1 Coleta e transporte

A CBC residual utilizada nesta pesquisa foi coletada na usina Jalles Machado S/A, indústria sucroalcooleira do município de Goianésia, Goiás, Brasil. A coleta do material ocorreu na própria indústria, sendo transportada e armazenada em embalagens plásticas até a etapa do peneiramento. Esta cinza foi escolhida a partir da pesquisa realizada por Sousa (2009), que comparou as propriedades químicas e físicas de CBC's provenientes de três indústrias sucroalcooleiras do estado de Goiás. Não houve nenhum controle do processo de queima ou resfriamento da CBC residual obtida.

5.2.1.2 Peneiramento e secagem

A CBC coletada na usina foi transportada para a Escola de Engenharia Civil da Universidade Federal de Goiás (UFG) onde passou por peneiramento com abertura nominal de 1,19 mm e, em seguida, submetida a um processo de secagem em estufa ventilada da marca Deleo, com dimensões internas de 83 x 146 x 96 cm, à temperatura de 120 ºC ± 5 ºC, pelo período de 24 h.

5.2.1.3 Moagem da CBC residual

Com a finalidade de se obter uma granulometria adequada para uma adição mineral com possíveis características pozolânicas ou de preenchimento (filer), realizou-se um estudo inicial para determinar o tempo de moagem necessário. Para tanto, amostras de CBC residual sem moagem e com moagem de 30 minutos, 60, 120, 180 e 240 minutos foram analisadas por meio do ensaio de granulometria a laser.

A moagem da cinza foi realizada no Departamento de Controle Tecnológico (DCT) de Furnas Centrais Elétricas S/A, com a utilização de um moinho de bolas, conforme a Figura 5.2 (a). A utilização deste tipo de moinho se justificou pela necessidade de padronização da energia de moagem. A cada utilização do moinho foram moídas 2 kg de amostra de CBC residual, o que conferiu ao moinho uma taxa de enchimento de 28,6 % com este material.

O moinho de bolas da marca Marconi, modelo MA -701/21, com formato cilíndrico e volume interno de 21,2 L é ilustrado na Figura 5.2 (b). Este moinho tem dimensões internas de 30 cm de diâmetro por 30 cm de largura, com rotação horizontal e frequência de 68,33 rpm, ou seja, 4100 voltas por hora. No interior do moinho, foram utilizadas 44 esferas, com quatro diâmetros distintos (24 mm, 34 mm, 38 mm e 45 mm), totalizando uma massa de 9,1 kg de esferas.

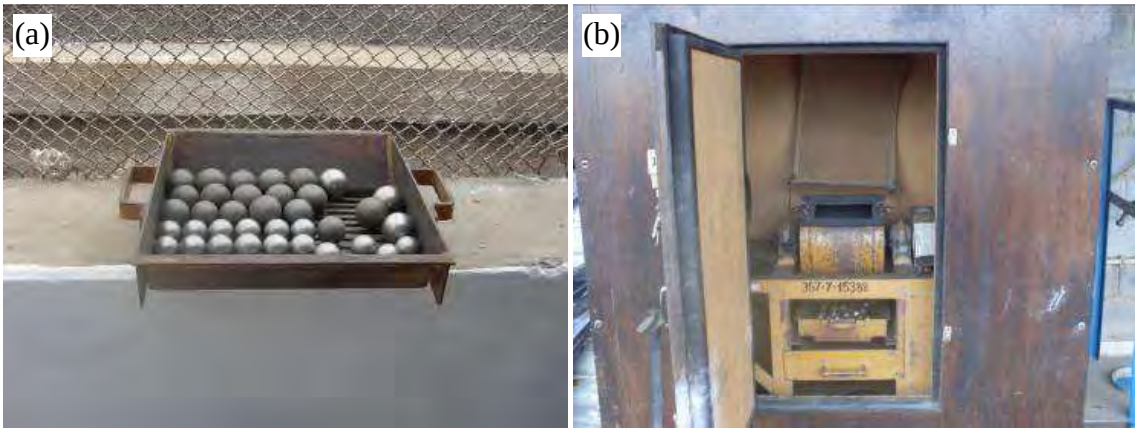

Figura 5.2 – (a) Detalhe das esferas de aço utilizadas no moinho; (b) Moinho, com isolamento acústico, utilizado para moagem da CBC residual.

5.2.1.4 Armazenamento e homogeneização

Após a moagem, a CBC residual foi condicionada em embalagens plásticas de polietileno impermeáveis a umidade, contendo 2 kg em cada embalagem, totalizando 52 kg. Antes da utilização da CBC residual nos concretos produzidos, esta foi condicionada em tambor metálico que possibilitou a homogeneização de toda amostra desta adição e facilitou sua utilização durante a produção dos concretos.

5.2.2 Caracterização dos aglomerantes

As caracterizações físicas e químicas da CBC residual e do cimento Portland tipo CPV–ARI foram realizadas no laboratório de Química do DCT de Furnas. Os ensaios de caracterização incluíram a determinação de massa específica, área específica, índice de atividade pozolânica com a cal e com o cimento, atividade química (Chapelle modificado), perda ao fogo, análise granulométrica e difração de Raios X (Tabela 5.3).

Tabela 5.3 – Ensaios de caracterização da CBC residual.

Ensaio	Método	Norma
Massa específica (g/cm³)	Picnômetro de Hélio	IT. DCT.CA. 117 [1]
Área específica (cm²/g)	BET	-
Índice de atividade pozolânica com a cal (MPa)	Resistência aos 7 dias	NBR 5751:1992
Índice de atividade pozolânica com o cimento (%)	Resistência aos 28 dias	NBR 5752:1992b
Atividade química (mg CaO/g amostra)	Chapelle Modificado	-
Perda ao fogo (%)	950ºC ± 50ºC	NBR NM 18:2004
Análise granulométrica	Granulometria a laser	IT. DCT.CA. 103 [1]
Difração de Raios X	Identificação mineralógica	IT. DCT.CA. 121 [1]

[1] Instrução de Trabalho do Departamento de Controle Técnico de Furnas.

A massa específica da CBC residual foi calculada com a utilização de um picnômetro de hélio, da marca Quantachrome e modelo Ultrapycnometer 1000, utilizando a Instrução de Trabalho do Departamento de Controle Técnico de Furnas - IT. DCT. CA. A densidade real de sólidos foi determinada a partir da verificação do volume de uma massa conhecida por meio da variação da pressão do gás hélio em um volume calibrado. A utilização deste gás é justificada por sua capacidade de penetração nos poros mais finos com dimensões aproximadas de um *angstrom*.

A determinação da massa específica do cimento, por sua vez, foi obtida com a utilização do frasco volumétrico de Le Chatelier e com líquidos isentos de água. A utilização destes líquidos tem a finalidade de evitar reações de hidratação do cimento, como preconiza a NBR NM 23 (ABNT, 2001a).

A área específica representa o somatório de áreas das partículas de um material. Uma adição mineral, com maior área específica tem maior área de contrato como o cimento e maior possibilidade de reatividade. A área específica foi determinada pelo método BET (Brunauer-Emmet-Teller). Neste método as amostras são previamente aquecidas para a eliminação da umidade e de gases adsorvidos na superfície da amostra. Os valores de superfície específica, obtidos a partir de dois métodos de ensaios diferentes, não podem ser objetos de comparação. Para o método Blaine, NBR NM 76 (ABNT, 1998), apenas os caminhos contínuos da amostra é mensurado na determinação da área específica, enquanto para o método BET, o valor medido é maior, uma vez que as moléculas gasosas também acessam a superfície interna.

O índice de atividade pozolânica com a cal, realizado conforme a NBR 5751 (ABNT, 1992), foi ensaiado após a determinação da massa específicas da CBC residual e da Cal. A argamassa para este ensaio foi preparada com 9 partes, em massa, de areia normal, uma parte de $Ca(OH)_2$ - hidróxido de cálcio e duas partes de CBC residual. A água foi adicionada até atingir o índice de consistência igual á 225 ± 5 mm, conforme a NBR 7215 (ABNT, 1996). A atividade pozolânica com a cal foi determinada pela resistência à compressão dos corpos-de-prova aos 7 dias de idade.

O índice de atividade pozolânica com o cimento Portland, ensaiado conforme a NBR 5752 (ABNT, 1992b), contou com a produção de duas argamassas. Na primeira argamassa o traço em massa igual a 1:3 de cimento e areia normal, sendo que a água foi ajustada para um índice de consistência de 225 ± 5 mm e na outra produzida pelo mesmo método, 35% do volume de cimento utilizado foi substituído pela CBC residual. Foram moldados 6 corpos-de-prova, sendo 3 para cada tipo de argamassa. As argamassas foram curadas nos moldes durante 24 horas e posteriormente curadas à temperatura de 38 ± 2ºC por 27 dias. Os corpos-de-prova receberam um capeamento à quente com enxofre e foram ensaiados à compressão axial. O índice de atividade pozolânica foi determinado pela razão entre as resistências à compressão axial média da argamassa com a CBC residual e da argamassa de referência. O resultado determinado aos 28 dias é expresso em valor percentual.

O potencial pozolânico da CBC residual foi calculado por meio do ensaio de atividade química, utilizando o Método Chapelle modificado que determina a atividade

pozolânica à (90±5)°C. A pozolanicidade foi avaliada, por meio da comparação da quantidade de hidróxido de cálcio consumido, em miligrama por grama de amostra, presente na fase líquida em contato com o cimento hidratado em relação à quantidade de hidróxido de cálcio que pode saturar um meio de mesma alcalinidade.

A perda ao fogo foi obtida de acordo com os procedimentos prescritos na NBR NM 18 (ABNT, 2004). O ensaio consiste, basicamente, no aquecimento da amostra em forno mufla à temperatura de 950°C ± 50°C, com taxa de aquecimento de 10°C/minuto e tempo de residência de 15 minutos. O valor de perda ao fogo é obtido pela média de quatro repetições, utilizando a Equação (5.1).

$$PF = \frac{(m_{110} - m_{950})}{m_{110}} \qquad \text{Eq. 5.1}$$

Onde:
PF: perda ao fogo;
m_{110}: massa da amostra seca em estufa a 110°C ± 10°C;
m_{950}: massa da amostra calcinada a 950°C ± 50°C.

A distribuição granulométrica da CBC foi analisada, com a utilização do equipamento Cilas da Acil & Weber no DCT- Furnas, utilizando-se hexamentafosfato de sódio dissolvido em água como meio dispersante. O equipamento é composto por um sistema de dispersão e um sistema focal. O raio laser emitido varia sua difração conforme o tamanho das partículas da amostra dispersa no líquido. Quanto menor o grão maior será a incidência, possibilitando a realização do método em poucos segundos (Figura 5.3). Foram encontrados como resultados os diâmetros que correspondem à distribuição acumulada nos teores de 10%, 50% e 90%, além da distribuição discreta do diâmetro das partículas e a distribuição acumulada.

Figura 5.3 – (a) Equipamento de granulometria a laser; (b) Monitoramento do ensaio.

O ensaio de Difração de raios X permite a identificação mineralógica dos compostos cristalinos que compõem os materiais, como o quartzo, presente na CBC. A amostra de CBC foi moída até a completa passagem na peneira com abertura de 75 μm. A massa preparada de cada amostra foi de 4 gramas. As fases cristalinas foram identificadas a partir da conferência com difrações padrões, uma vez que, na maioria dos sólidos os átomos se orientam em planos cristalinos separados por distâncias da mesma ordem de grandeza do comprimento de onda de raios X. Desta forma foi possível determinar a distância entre os planos cristalinos adjacentes. A amplitude e quantidade dos picos indicam a ausência de amorficidade e consequentemente menor reatividade da amostra. O ensaio possibilita uma medida qualitativa com identificação dos constituintes da amostra. Mesmo utilizando a comparação com elementos conhecidos, não proporciona uma medida quantitativa com a determinação exata da substância.

5.2.3 Caracterização do aditivo superplastificante

O aditivo superplastificante, Sika Viscocrete 3535, foi caracterizado no laboratório de Química do DCT de Furnas. Para tanto, foi analisado o pH, percentual de resíduo sólido e massa específica. A escolha deste aditivo para o uso nos corpos-de-prova de relação a/agl igual a 0,37, foi motivada pela eficiência do produto na adsorção superficial e separação nas partículas de cimento na produção de Concretos de Alto Desempenho (CAD), considerando o baixo consumo de água deste tipo de concreto, que foi de 211 kg/m³ de concreto, enquanto o consumo de aglomerante foi de 566 kg/m³ de concreto. As composições dos concretos produzidos neste trabalho se encontram no Item 5.2.5.

As propriedades do aditivo, segundo o fabricante, são descritas na Tabela 5.4. As propriedades encontradas nesta pesquisa, por sua vez, encontram-se no Item 6.3 do Capítulo 6.

Tabela 5.4 – Propriedades do aditivo superplastificante, segundo o fabricante (SIKA, 2005).

Ação Principal	Redutor de água de altíssima eficiência
Composição básica	Solução de policarboxilato em meio aquoso
Aspecto	Líquido
Cor	Castanho claro
Densidade à 25º C	1,04 a 1,08 kg/L
pH	3,5 a 5,5

5.2.4 Caracterização dos agregados

O agregado miúdo utilizado foi uma areia média quartzosa de origem natural de leito de rio, com dimensão máxima de 4,75 mm. Como agregado graúdo foi empregado uma brita de origem granítica, com dimensão máxima de 19 mm.

Antes dos estudos de dosagem e da concretagem, estes agregados foram caracterizados nos ensaios de composição granulométrica, de acordo com a NBR NM 248 (ABNT, 2003a), massa específica, NBR NM 52 e NM 53 (ABNT, 2003b; ABNT, 2003c), e absorção de água do agregado miúdo de acordo com a NBR NM 30 (ABNT, 2001b).

5.2.5 Parâmetros de mistura do concreto

Os concretos foram dosados a partir da definição inicial de duas relações água/aglomerante (a/agl) de 0,37 e 0,60, a fim de se produzir concretos de alto desempenho (CAD) e convencionais, respectivamente. Foram moldados corpos-de-prova com cimento CPV-ARI, como único material cimentante, para os corpos-de-prova de referência e, também, corpos-de-prova com substituição parcial deste cimento, em massa, pela CBC residual, nos teores de 5%, 10% e 20%. Os traços foram ajustados adotando como referência o volume constante de argamassa em 51% e o abatimento de tronco de cone de 130 ± 20 mm.

No ajuste do traço definitivo, não foi considerada a diferença de massa específica entre a CBC residual e o cimento Portland CPV-ARI, uma vez que a proporção de substituição do cimento por esta adição mineral ocorreu em massa. Para a mistura do concreto convencional e de alto desempenho, os insumos foram colocados na betoneira na ordem descrita na Tabela 5.5, de acordo com os procedimentos de Furnas.

Tabela 5.5 – Tempo de mistura e ordem de colocação de materiais na betoneira.

Etapas	Tempo (minutos)	
	Concreto convencional a/agl = 0,60	Concreto de alto desempenho a/agl = 0,37
Agregado graúdo e miúdo e 30% da água	1	1
Cimento, CBC residual[1], 70 % da água e aditivo[2]	3	3
Parada	3	3
Mistura final	3	3
Tempo total	10	10

[1] A CBC residual, não foi utilizada no traço de referência. Nos demais traços, o teor de substituição variou de 5%, 10% e 20%, em massa.
[2] O aditivo superplastificante foi utilizado apenas no concreto de alto desempenho (relação a/agl de 0,37) para corrigir a trabalhabilidade.

O aditivo superplastificante não foi utilizado para o traço do concreto convencional, porém para o CAD foi adicionado 0,8% da parte sólida do aditivo, em relação ao material cimentante, para garantir o abatimento de tronco de cone igual a 130 ± 20 mm, conforme apresentado nas Tabelas 5.6 e 5.7.

Tabela 5.6 – Composição do concreto convencional.

Traço[1]	a/agl[2]	Composição dos materiais[2] (kg/m³)						
		agl	Cimento	CBC	Brita	Areia	Água	Aditivo
Referência	0,60	367	367	-	1150	592	220,3	-
5%	0,60	367	348,6	18,4	1150	592	220,3	-
10%	0,60	367	330,3	36,7	1150	592	220,3	-
20%	0,60	367	293,6	73,4	1150	592	220,3	-

[1] Referência: Concreto de referência; 5%: concreto com substituição parcial de 5% do cimento por CBC residual; 10%: concreto com substituição parcial de 10% do cimento por CBC residual; 20%: concreto com substituição parcial de 20% do cimento por CBC residual.
[2] a/agl: Relação água / aglomerante; agl: Aglomerante (C + CBC); C: Cimento Portland (CPV-ARI); CBC: cinza do bagaço de cana-de-açúcar residual; Brita: Agregado graúdo (Brita 1); Areia: Agregado miúdo (Areia Média); Aditivo: Parte sólida do aditivo superplastificante.

Tabela 5.7 – Composição do concreto de alto desempenho.

Traço[1]	a/agl[2]	Composição dos materiais[2] (kg/m³)						
		agl	Cimento	CBC	Brita	Areia	Água	Aditivo
Referência	0,37	566	566	-	1150	481	211	4,53
5%	0,37	566	537,7	28,3	1150	481	211	4,53
10%	0,37	566	509,4	56,6	1150	481	211	4,53
20%	0,37	566	452,8	113,2	1150	481	211	4,53

[1] Referência: Concreto de referência; 5%: concreto com substituição parcial de 5% do cimento por CBC residual; 10%: concreto com substituição parcial de 10% do cimento por CBC residual; 20%: concreto com substituição parcial de 20% do cimento por CBC residual.
[2] a/agl: Relação água / aglomerante; agl: Aglomerante (C + CBC); C: Cimento Portland (CPV-ARI); CBC: cinza do bagaço de cana-de-açúcar residual; Brita: Agregado Graúdo (Brita 1); Areia: Agregado Miúdo (Areia Média); Aditivo: Parte sólida do aditivo superplastificante.

5.3 DETERMINAÇÃO DAS PROPRIEDADES DO CONCRETO FRESCO

5.3.1 Determinação da massa específica – Método gravimétrico

A massa específica do concreto fresco foi determinada para todos os traços do programa experimental, seguindo os preceitos da NBR 9833 (ABNT, 2008a). Utilizou-se um recipiente metálico de volume conhecido (Figura 5.4). A massa específica foi determinada pela relação da massa do concreto pelo volume do recipiente.

Figura 5.4 – Forma utilizada para determinação da massa específica do concreto fresco.

5.3.2 Determinação do abatimento

O abatimento do concreto fresco pelo ensaio de tronco de cone, também conhecido como *slump*, é muito empregando na determinação da trabalhabilidade do concreto fresco em função da sua fácil execução. A NBR NM 67 (ABNT, 2002a) normatiza este procedimento ilustrado na Figura 5.5.

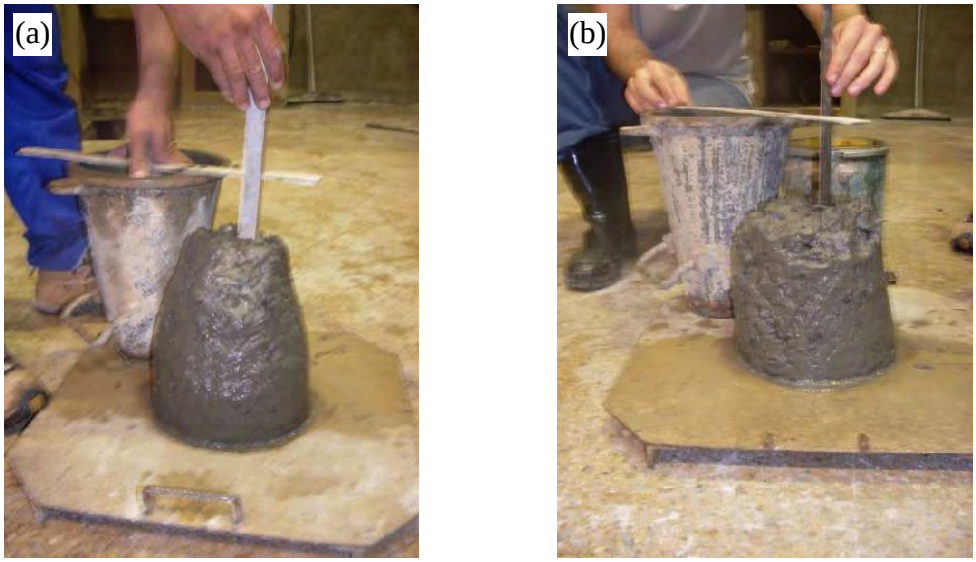

Figura 5.5 – Determinações do *slump*, (a) para o concreto e convencional e (b) para o CAD.

5.3.3 Ar incorporado - Método pressométrico

A determinação do teor de ar incorporado no concreto fresco, método pressométrico, é realizada de acordo com a NBR NM 47 (ABNT, 2002b). O preenchimento do recipiente com o concreto fresco é ilustrado na Figura 5.6.

Figura 5.6 – Ensaio para a determinação do teor de ar incorporado no concreto fresco.

5.4 CORPOS-DE-PROVA DE CONCRETO

A caracterização do concreto contou com a moldagem de 188 corpos-de-prova utilizados na realização dos ensaios descritos anteriormente na Tabela 5.1. O adensamento dos corpos-de-prova foi realizado com a utilização de vibrador de imersão. As quantidades dos corpos-de-prova confeccionados, bem como a descrição da composição, dimensão e relação água/aglomerante (a/agl) de cada corpo-de-prova estão descritos na Tabela 5.8.

Tabela 5.8 – Quantidade, composição, dimensões e relação (a/agl) dos corpos-de-prova.

Concreto[1]	Dimensão dos corpos-de-prova (mm) Relação a/agl				Total de corpos-de-prova
	150x300 0,37	150x300 0,60	60x200x200 0,37	60x200x200 0,60	
Referência	15	24	4	4	47
5%	15	24	4	4	47
10%	15	24	4	4	47
20%	15	24	4	4	47
Total	60	96	16	16	188

[1] Referência: Concreto de referência; 5%: concreto com substituição parcial de 5% do cimento por CBC residual; 10%: concreto com substituição parcial de 10% do cimento por CBC residual; 20%: concreto com substituição parcial de 20% do cimento por CBC residual.

5.4.1 Moldagens dos corpos-de-prova cilíndricos

Foram moldados 156 corpos-de-prova em fôrmas metálicas cilíndricas com dimensões de 150 mm de diâmetro por 300 mm de altura. O adensamento do concreto e os corpos-de-prova cilíndricos são apresentados na Figura 5.7 (a) e (b). Depois de 24 horas da moldagem dos corpos-de-prova cilíndricos, foram desformados e encaminhados à câmara úmida para cura até as respectivas datas dos ensaios.

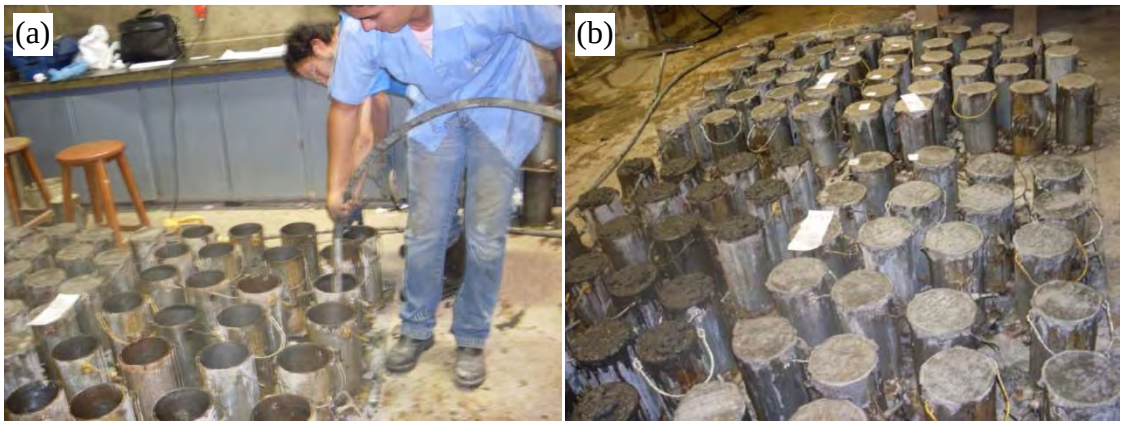

Figura 5.7 – (a) Adensamento do concreto nas fôrmas; (b) corpos-de-prova cilíndricos.

5.4.2 Moldagens dos corpos-de-prova prismáticos

Para o ensaio de carbonatação natural e acelerada foram moldados 32 corpos-de-prova prismáticos em fôrmas de compensado plastificado. As dimensões destes corpos-de-prova estão ilustradas na Figura 5.8.

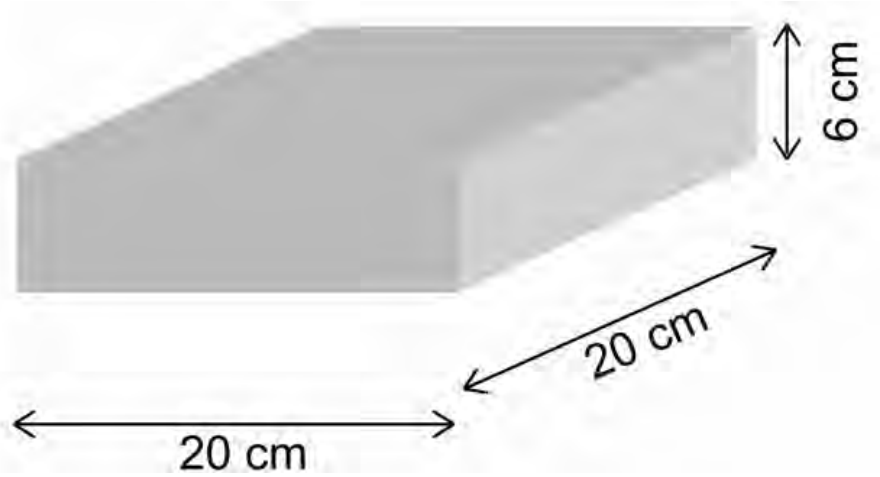

Figura 5.8 – Dimensões dos corpos-de-prova prismáticos.

Para cada composição de concreto foram moldados quatro corpos-de-prova, dois para a carbonatação natural e dois para a carbonatação acelerada. A extremidade dos corpos-de-prova foi quebrada para a idade de 290 dias, para a verificação do avanço da profundidade de carbonatação. A carbonatação foi determinada com o auxílio de uma solução com fenolftaleína, que é o indicador de pH mais comumente utilizado para esta avaliação. Na Figura 5.9 é ilustrada a moldagem dos corpos-de-prova prismáticos. A desforma dos corpos-de-prova ocorreu 24 horas após a concretagem. Em seguida estes foram encaminhados para uma sala de Laboratório, com umidade relativa de 70% ±10% e temperatura em 25ºC ±5ºC.

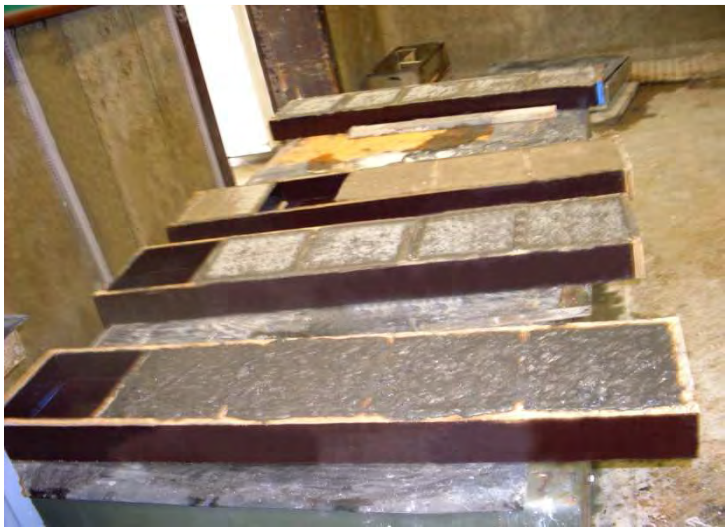

Figura 5.9 – Concretagem de corpos-de-prova prismáticos.

5.5 PROPRIEDADES MECÂNICAS DO CONCRETO

5.5.1 Resistência à compressão e módulo de elasticidade

Após 24 horas da moldagem, os corpos-de-prova foram desformados e encaminhados para câmara úmida à temperatura de 23°C ± 2°C e umidade maior que 90% até a data da realização dos ensaios de resistência mecânica. A resistência à compressão dos concretos foi avaliada por meio da ruptura de corpos-de-prova cilíndricos, com 150 mm de diâmetro e 300 mm de altura, em prensa hidráulica, de acordo com as prescrições da NBR 5739 (ABNT, 1994a).

Antes da ruptura, os corpos-de-prova cilíndricos foram capeados com uma massa contendo enxofre para garantia do paralelismo entre as bases e perpendicularidade do cilindro de acordo com a Figura 5.10 (a). O ensaio de resistência à compressão axial foi realizado em uma prensa hidráulica universal no laboratório de Furnas, conforme a Figura 5.10 (b).

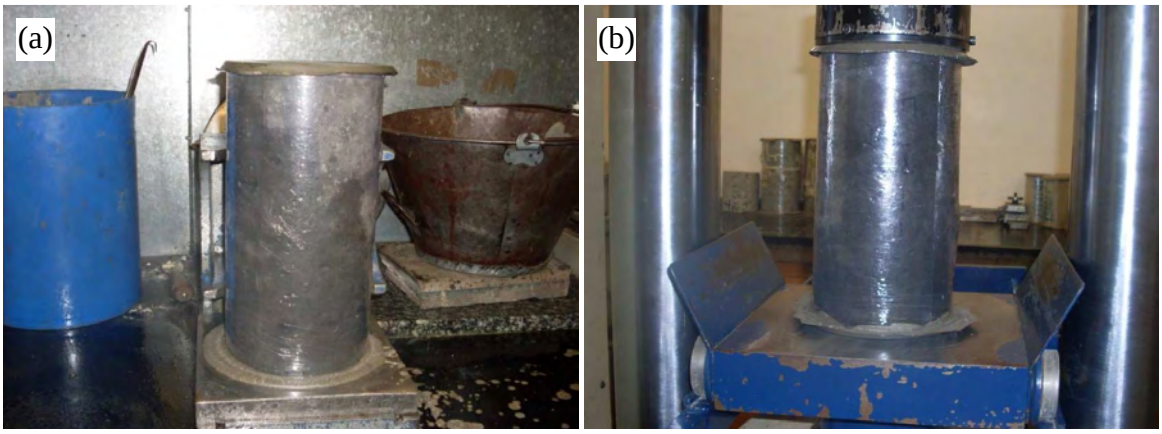

Figura 5.10 – (a) Capeamento dos corpos-de-prova; (b) Prensa do ensaio de compressão.

O ensaio do módulo de elasticidade corresponde diretamente à estabilidade dimensional das estruturas de concretos. O comportamento tensão versus deformação foi obtido com emprego de relógios comparadores digitais para medição dos deslocamentos longitudinais. O cálculo do módulo de elasticidade secante foi determinado conforme NBR 8522 (ABNT, 2008b). Na Figura 5.11, podem ser visualizados os instrumentos utilizados neste ensaio.

Figura 5.11 – Instrumentação utilizada para a determinação do módulo de elasticidade

5.5.2 Resistência à tração por compressão diametral

A resistência à tração foi determinada no laboratório de Furnas com a utilização de corpos-de-prova cilíndricos com 15 cm de diâmetro e 30 cm de altura. Uma vez que a medição experimental da tração uniaxial pura, sem excentricidade, apresenta inúmeras dificuldades, ensaios indiretos são empregados para a determinação da resistência à tração do concreto. O ensaio de compressão diametral (NBR 7222) apresenta-se como alternativa para se estimar a resistência à tração devido à facilidade de execução (ABNT, 1994b).

De acordo com Mehta e Monteiro (2008), quando comparado com o ensaio de tração direta, o teste de compressão diametral superestima a resistência à tração do concreto de 10% a 15%. O estado de tensões (compressão e tração) que atuam em um elemento do diâmetro vertical do corpo-de-prova durante o ensaio, pode ser observado na Figura 5.12, de acordo com a teoria da elasticidade para material homogêneo. As tensões de tração e compressão, calculadas pela solução elástica para carregamento uniforme em arcos finitos de disco e do critério de ruptura de Griffith, são apresentadas nas Equações (5.2) e (5.3), respectivamente.

$$\sigma_t = \frac{2F_r}{DL\pi} \qquad \text{Eq. 5.2}$$

$$\sigma_c = \frac{2F_r}{DL\pi}\left(\frac{D^2}{r(D-r)} - 1\right) \qquad \text{Eq. 5.3}$$

Onde:
σ_t: resistência à tração por compressão diametral;
σ_c: tensão de compressão;
F_r: carga de ruptura;
D: diâmetro do corpo-de-prova;
r: distância do elemento ao prato superior da prensa;
L: espessura do corpo-de-prova.

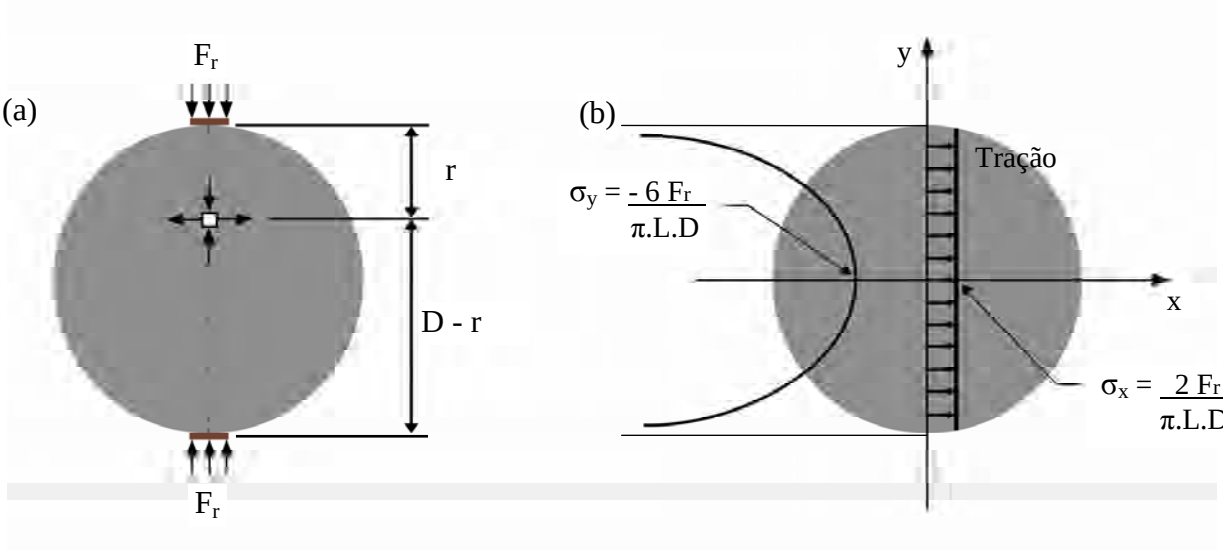

Figura 5.12 – (a) Estado de tensões atuantes em elemento do diâmetro vertical do corpo-de-prova durante ensaio; (b) Tensões máximas de compressão (σ_y) e tração (σ_x). (Cordeiro, 2006) com adaptações.

A execução do ensaio de resistência à tração por compressão diametral pode ser observada na Figura 5.13 (a). Um dos corpos-de-prova rompidos no ensaio de resistência a tração é ilustrado na Figura 5.13 (b).

Figura 5.13 – (a) Realização do ensaio de compressão diametral (b) Corpo-de-prova ensaiado

5.6 ENSAIOS RELATIVOS À DURABILIDADE

5.6.1 Determinação da absorção de água por capilaridade

A absorção capilar de água pelo concreto foi determinada de acordo com a NBR 9779 (ABNT, 1995). Na Figura 5.14 são ilustrados alguns procedimentos do ensaio de absorção capilar, incluindo secagem, determinação da massa e disposição do corpo-de-prova durante o ensaio. O cálculo para a determinação da absorção de água por capilaridade no concreto é apresentado na Equação 5.4.

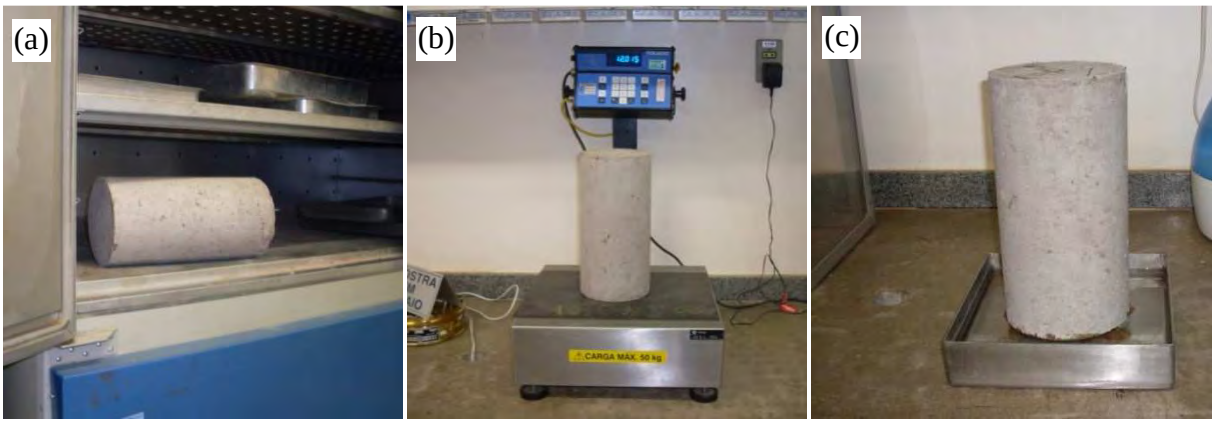

Figura 5.14 – Procedimento do ensaio de absorção capilar.

$$Abs.cap. = \frac{M_{úmido} - M_s}{A_{abs}}\ x\ 100 \qquad \text{Eq. 5.4}$$

Onde:
Abs. cap.: Absorção de água por capilaridade (g/cm²);
M_{sat}: Massa do corpo-de-prova úmido (g);
M_s: Massa do corpo-de-prova seco (g);
A_{abs}: Área de absorção (cm²).

5.6.2 Determinação da absorção de água por imersão, índice de vazios e massa específica dos concretos

A absorção de água por imersão, o índice de vazios e a massa específica dos concretos foi determinada de acordo com a NBR 9778 (ABNT, 1992b). Estes ensaios foram realizados para os concretos com relação a/agl de 0,60. Para cada teor de substituição (Referência, 5%, 10% e 20%) confeccionou-se 3 corpos-de-prova. O primeiro passo do ensaio consiste na realização da secagem em estufa à temperatura de 105ºC ±5ºC, até a constância de massa. Devido ao grande tempo de secagem igual a 144 horas, considerou-se que os corpos-de-prova já haviam atingido uma massa constante.

As massas saturadas foram obtidas após a imersão em água à temperatura de 23ºC ±2ºC em 24, 48 e 72h de imersão e finalmente para saturação foi empregada a imersão em recipiente cheio de água, levado à ebulição, e assim permanecendo por 5 horas. O resfriamento da água ocorreu naturalmente, em período mínimo de 14 horas, até a temperatura de 23ºC ±2ºC. Em seguida retiraram-se os corpos-de-prova da água, enxugando-os e pesando-os em seguida.

O índice de vazios foi calculado conforme a NBR 9778 (ABNT, 1987). Este índice também é conhecido porosidade, uma vez que expressa um percentual entre o volume dos poros acessíveis à água e o volume total do corpo-de-prova. A massa específica do concreto foi calculada para três situações, massa específica seca, massa específica após saturação e fervura e massa específica real.

5.6.3 Permeabilidade

O ensaio de permeabilidade, realizado de acordo com a NBR 10786 (ABNT, 1989), determina a vazão periódica de água que passa através do corpo-de-prova (Figura 5.15). Este ensaio foi realizado apenas nos concretos de relação a/agl igual a 0,60. O corpo-de-prova para este ensaio foi obtido cortando-se e removendo-se os 7,5 cm do topo e os 7,5 cm da base do corpo-de-prova de 15x30 cm, resultando em um corpo-de-prova de 15 cm de diâmetro e 15 cm de altura. A superfície externa lateral foi revestida com material impermeável. O coeficiente de permeabilidade, calculado pela lei de Darcy, foi medido segundo a Equação (5.6).

$$K = \frac{Q \,.\, L}{A \,.\, H} \qquad \text{Eq. 5.6}$$

Onde:
K: coeficiente de permeabilidade (cm/s);
Q: vazão de entrada (cm^3/s);
L: altura do corpo-de-prova (cm);
A: área da seção transversal do corpo-de-prova (cm^2);
H: altura da coluna d´água correspondente à pressão utilizada (cm);

Figura 5.15 – Preparação dos corpos-de-prova do ensaio de permeabilidade e realização das leituras.

5.6.4 Profundidade de carbonatação do concreto

A profundidade de carbonatação foi determinada em corpos-de-prova prismáticos submetidos à dois tipos de ambientes. Para a carbonatação acelerada foram utilizados os corpos-de-prova apresentados na Figura 5.17 (a), os quais, após 60 dias da moldagem, foram conduzidos para uma câmara de carbonatação com umidade controlada em 70% ±10% e temperatura de 25ºC ±5ºC, sendo monitoradas por termômetro/higrômetro digital, cuja leitura é detalhada na Figura 5.17 (c).

A umidade foi garantida pela presença de uma solução de ácido sulfúrico a 50%, em um compartimento no fundo da câmara de carbonatação, como pode ser observado na Figura 5.17 (c). Esta metodologia é preconizada pela ASTM E 104 – 51 (1971). Periodicamente o ar da câmara foi substituído por gás carbônico (CO_2) para garantir que o ambiente estivesse completamente preenchido com CO_2 e, portanto, com alta capacidade de carbonatar o concreto.

Outros corpos-de-prova permaneceram no ambiente de laboratório para determinação da profundidade de carbonatação natural (Figura 5.17 b). Na Figura 5.17 (d) pode ser observada a leitura da profundidade de carbonatação com o auxílio de um paquímetro, logo após a aspersão da solução alcoólica com fenolftaleína.

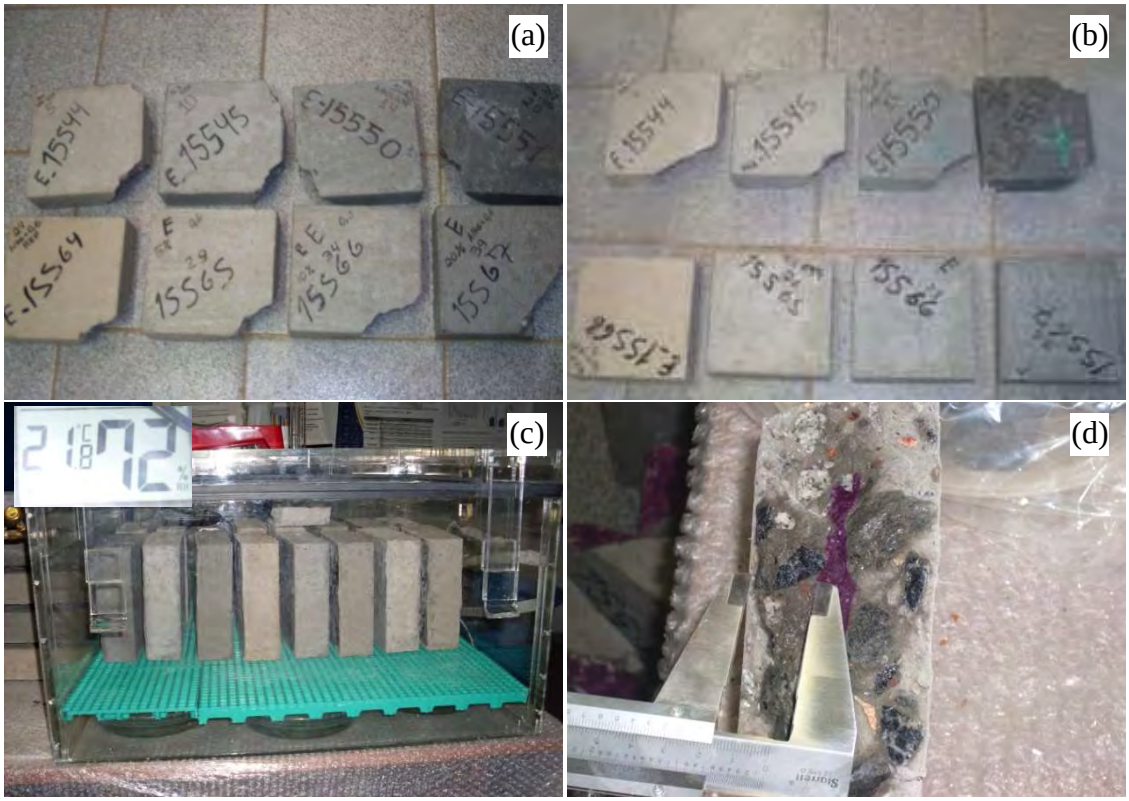

Figura 5.16 – Determinação de profundidade de carbonatação: (a) Corpos-de-prova da câmara de carbonatação; (b) Corpos-de-prova ao ar livre em laboratório (c) Câmara de carbonatação, com destaque da medida de umidade e temperatura (d) Determinação da profundidade de carbonatação.

A profundidade de carbonatação foi determinada pela quebra de parte do corpo-de-prova e com a utilização de uma solução com fenolftaleína, indicador de pH, com faixa de viragem de pH entre 8,3 e 10,0. A solução foi preparada, segundo a Rilem (1988), com 1g de fenolftaleína dissolvida em 70 cm^3 de etanol e 30 cm^3 de água. Na Figura 5.17 (a) é ilustrado um corpo-de-prova prismático antes da quebra de uma das extremidades. A aplicação da solução indicadora de pH e por consequência indicadora da profundidade da carbonatação pode ser observada na Figura 5.17 (b).

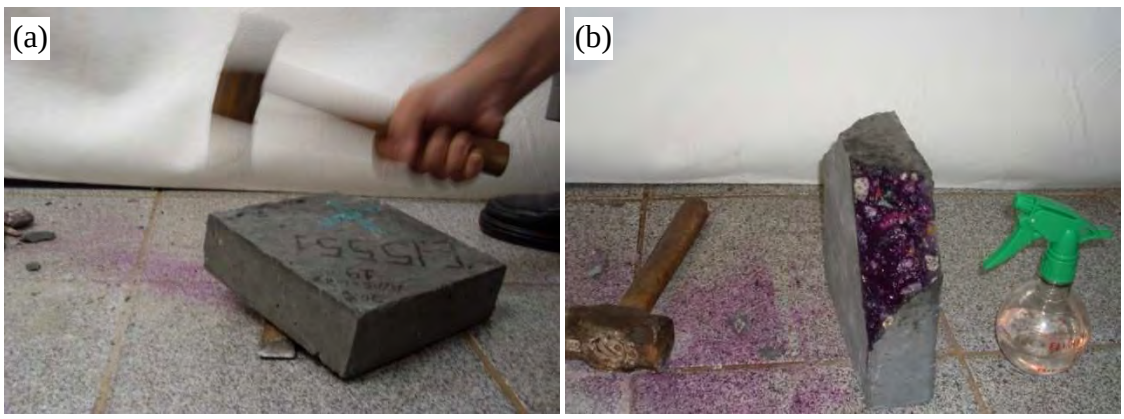

Figura 5.17 – (a) Quebra dos corpos-de-prova prismáticos para determinação da profundidade de carbonatação e (b) aplicação de solução de fenolftaleína

5.7 ANÁLISE ESTATÍSTICA

Os resultados dos ensaios deste trabalho foram submetidos à análise estatística, pois, desta forma, contribuiu-se para um melhor entendimento dos resultados e de suas interações com os parâmetros de cada ensaio. O experimento foi delineado inteiramente casualizado em esquema fatorial de terceira ordem (4 x 3 x 2). Foram analisados os efeitos da interação entre os fatores de variação. O teor de substituição do cimento Portland pela CBC em 4 níveis (0, 5, 10 e 20%); relação a/agl (0,37 e 0,60) e idade de cura em 3 níveis (7, 28 e 91 dias); sobre as variáveis respostas resistência à compressão axial.

O esquema fatorial, de segunda ordem (4 x 3), foi utilizado para os ensaios de resistência à tração e módulo de elasticidade, uma vez que nestes casos foi empregada somente a idade de 28 dias de cura do concreto. Todas as médias foram submetidas à análise de variância (ANOVA), sendo comparadas pelo teste de Tukey (α= 0,05). As análises estatísticas foram realizadas no programa *Statistica* versão Demo (STATSOFT, 2007).

6 APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS

6.1 CARACTERIZAÇÃO DA CBC RESIDUAL

6.1.1 Propriedades físicas e químicas

Os ensaios das propriedades físicas e químicas da cinza do bagaço de cana-de-açúcar (CBC) residual foram realizados no Laboratório de Furnas, na cidade de Aparecida de Goiânia-GO. Os resultados das propriedades físicas da adição mineral utilizada neste trabalho são descritos na Tabela 6.1.

Tabela 6.1 – Propriedades físicas da CBC residual.

Propriedades físicas analisadas	Valor encontrado
Massa específica (g/cm³)	2,40
Área específica (cm²/g)	11.390
Índice de atividade pozolânica com a cal (MPa)	6,4
Índice de atividade pozolânica com o cimento (%)	78,4
Atividade química - Chapelle Modificado (mg CaO/g amostra)	198

A área específica da CBC residual foi superior à área específica do cimento Portland CPV-ARI de 5.050 cm²/g. Isto indica que a CBC residual utilizada, moída por 4 horas em moinho de bolas, foi mais fina que o cimento empregado. O resultado do índice de atividade pozolânica com a cal superou o mínimo de 6 MPa, estipulado pela NBR 12653 (ABNT, 1992c). Segundo esta norma, um material é classificado como uma pozolana quando o valor mínimo do índice de atividade pozolânica com o cimento é de 75%. A determinação da atividade pozolânica com o cimento segue os preceitos da NBR 5752 (ABNT, 1992b). Para a CBC residual o valor encontrado foi superior ao valor mínimo, mesmo com o elevado valor para a perda ao fogo (19,38%).

O ensaio de determinação de atividade química por meio do método de Chapelle modificado oferece um parâmetro somente da atividade pozolânica do material, que deve apresentar um consumo mínimo de CaO igual a 330 mg/g de amostra para ser considerado um

material pozolânico. A CBC residual apresentou um consumo de 198 mg CaO/g, abaixo do estipulado pelo ensaio.

O resultado do ensaio de Chapelle confronta, então, com os resultados do índice de atividade pozolânica com a cal e com o cimento que superaram o mínimo estabelecido para uma pozolana. Possivelmente, os valores de atividade pozolânica com o cimento e com a cal, acima do valor mínimo, se devem mais pelo processo físico de empacotamento provocado pelo efeito microfiler do que com a reação pozolânica propriamente dita.

O valor encontrado para a perda ao fogo da CBC residual foi de 19,38%, enquanto os limites máximos permitidos pela NBR 12653 (ABNT, 1992c) são de 6,0% para material pozolânico das classes C e E ou de 10,0 para a classe N. Este fato indica que a CBC residual não passou por uma combustão adequada durante a queima do bagaço de cana na caldeira da usina sucroalcooleira. A combustão do bagaço é realizada a uma temperatura adequada com valores superiores a 600ºC, porém o tempo de permanência da CBC na caldeira é muito pequeno, uma vez que a maior parte do bagaço é queimada ainda durante a sua queda no interior da caldeira. Possivelmente, com um maior controle do tempo de permanência da CBC na caldeira, o valor de perda ao fogo possa reduzir consideravelmente, aumentando por sua vez, os teores dos outros componentes, como dióxido de silício que apresentou o teor de 62,58%. As propriedades químicas da CBC residual encontram-se detalhadas na Tabela 6.2.

Tabela 6.2 – Propriedades químicas da CBC residual.

Propriedades químicas analisadas		Valor encontrado (%)
Dióxido de silício (SiO_2)		62,58
Perda ao fogo		19,38
Óxido de alumínio (Al_2O_3)		6,51
Óxido de ferro (Fe_2O_3)		5,12
Óxido de magnésio (MgO)		1,14
Óxido de cálcio (CaO)		1,13
Álcalis totais	Óxido de potássio (K_2O)	2,26
	Óxido de sódio (Na_2O)	0,36
	Equiv. Alcalino	1,85
Álcalis solúveis em água	Óxido de potássio (K_2O)	0,05
	Óxido de sódio (Na_2O)	0,01
	Equiv. Alcalino	0,04
Sulfato de cálcio ($CaSO_4$)		0,00

O teor de dióxido de silício (SiO_2) é um fator importante, uma vez que o SiO_2 tem a capacidade de reagir com o $Ca(OH)_2$ da hidratação dos silicatos para a constituição de compostos com propriedades aglomerantes. O equivalente alcalino da CBC residual apresenta valor igual a 1,85%. Um cimento fabricado com a utilização desta CBC residual pode ter influência em seu teor de equivalente alcalino.

6.1.2 Análise granulométrica

A análise granulométrica da CBC residual, moída no moinho de bolas conforme descrito no programa experimental, pode ser observada na Tabela 6.3. A dimensão média encontrada para as partículas de CBC residual foi inferior a 10 µm. O ensaio de granulometria a laser, realizado no Laboratório de Furnas, utilizou como agente dispersante o hexamentafosfato de sódio dissolvido em água (Figura 6.1).

Tabela 6.3 – Análise granulométrica por raio laser da CBC residual.

Parâmetros	Valores (µm)
Diâmetro abaixo do qual se encontram 10% das partículas (D_{10})	1,14
Dimensão média	5,29
Diâmetro abaixo do qual se encontram 90% das partículas (D_{90})	24,70

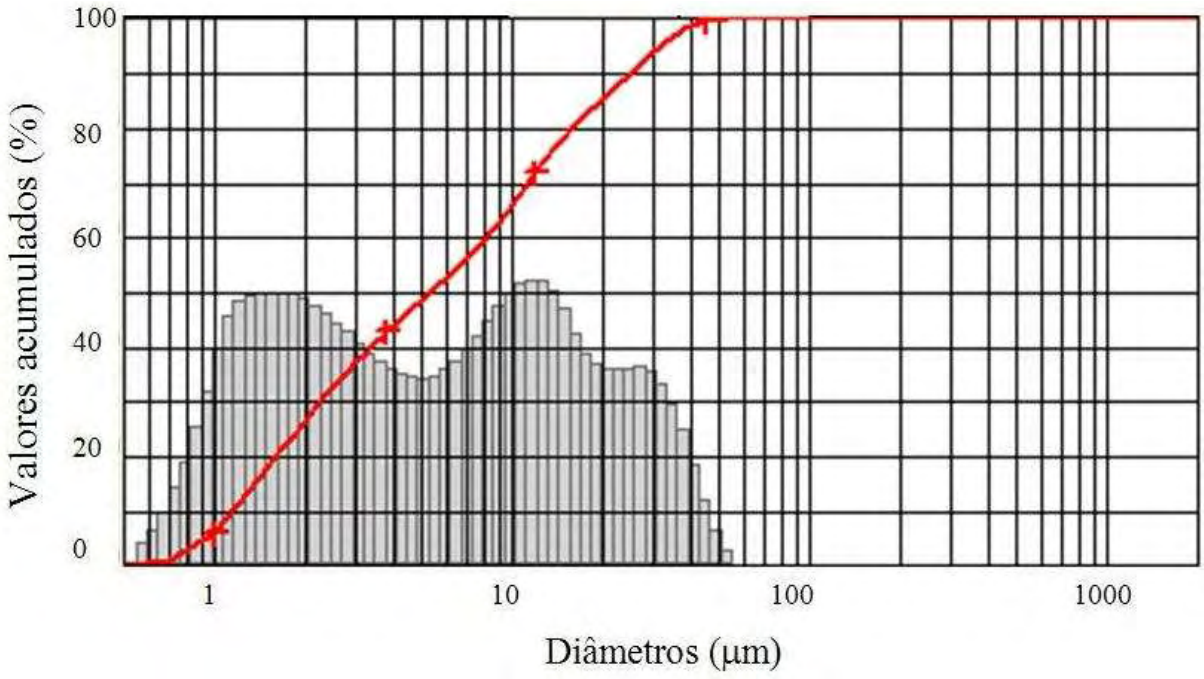

Figura 6.1 – Curva granulométrica determinada por meio do granulômetro a laser.

O valor D_{90} indica que a moagem foi adequada para o refinamento das partículas, apresentando apenas 10% das partículas com diâmetro acima de 24,7 µm. O diâmetro médio das partículas (5,29 µm) foi considerado adequado para uma pozolana, de acordo com Mehta e Monteiro (2008) que recomenda diâmetros médios inferiores a 10,0 µm.

6.1.3 Difração de Raios X

Na Figura 6.2 é apresentado o padrão de difração de Raios X da cinza do bagaço de cana-de-açúcar (CBC) residual, onde as fases cristalinas referentes ao quartzo e à cristobalita são identificadas. A estrutura da CBC foi considerada basicamente cristalina.

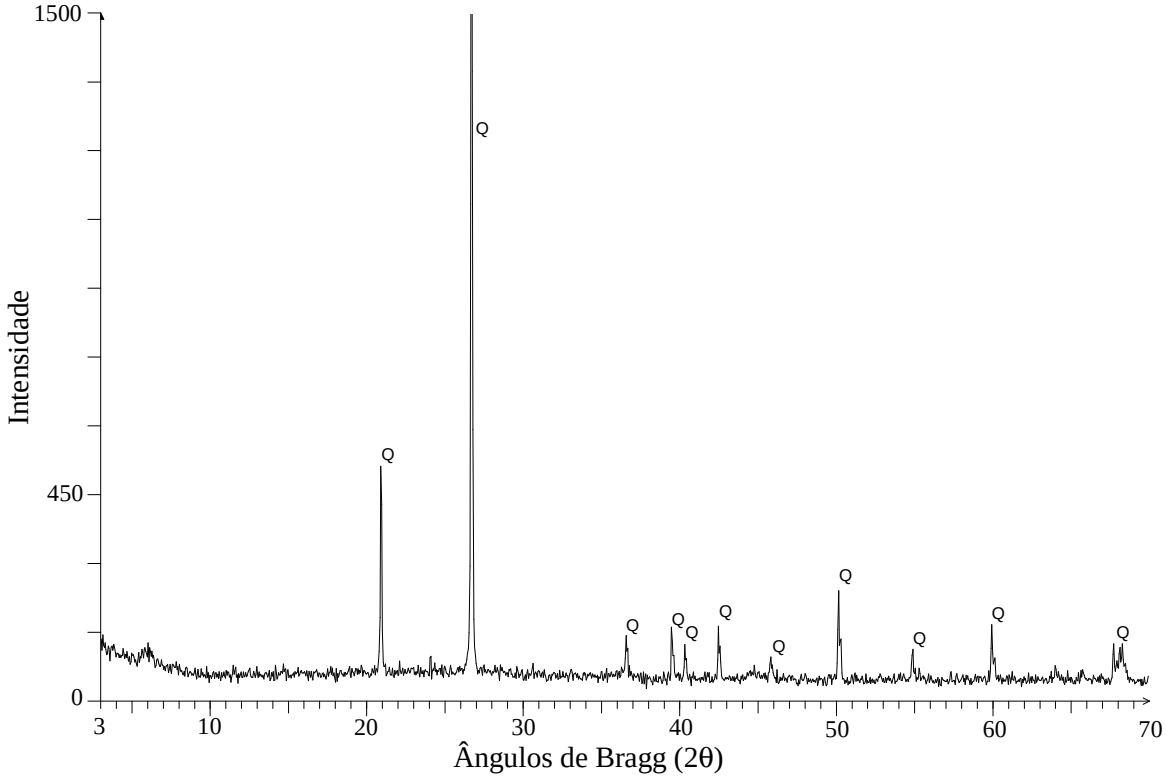

Figura 6.2 – Difratograma de raios X da cinza do bagaço de cana-de-açúcar residual.

A CBC residual não apresentou em sua estrutura bandas amorfas. Os picos do gráfico indicam a presença de sílica na forma de quartzo. Este resultado é condizente com o resultado de reatividade química pelo ensaio de Chapelle modificado, pois a CBC residual não atingiu o valor mínimo de 330 mg de consumo de óxido de cálcio, provavelmente em decorrência da reduzida reatividade em função do predomínio da estrutura cristalina.

6.2 CARACTERIZAÇÃO DO CIMENTO

As propriedades do cimento foram determinadas de acordo com as normas NBR NM 23 (ABNT, 2001a), NBR 5733 (ABNT, 1991) e NBR NM 43 (ABNT, 2002c). A caracterização física do cimento utilizado, realizada no laboratório de química de Furnas, pode ser observada na Tabela 6.4. As propriedades do cimento Portland CPV-ARI utilizado atenderam, de forma geral, os limites da norma NBR 5733 (ABNT, 1991), exceto quanto à resistência à compressão aos 7 dias e aos teores químicos de resíduo insolúvel e trióxido de enxofre, que apresentaram valores próximos ao limite.

Tabela 6.4 – Caracterização física do cimento.

Material: Cimento CPV-ARI TOCANTINS				
Propriedades Determinadas Ensaios Físicos		Valores encontrados	Limites	Norma
Massa específica (g/cm³)		3,11	-	NBRNM 23:2001
Finura	Resíduo na peneira 200 (%)	0,5	≤ 6,0	NBR 5733:1991
	Resíduo na peneira 325 (%)	2,6	-	
	Área específica (cm²/g)	5.050	≥ 3.000	
Tempo de pega (h:min)	Início	2:50	≥ 1:00	
	Fim	3:20	≤ 10:00	
Água de consistência – Pasta (%)		29,8	-	NBRNM 43:2002
Expansão em autoclave (%)		0,1	≤ 0,8	-
Resistência à compressão (MPa)	3 dias	30,3	≥ 24,0	NBR 5733:1991
	7 dias	33,8	≥ 34,0	
	28 dias	38,4	-	

Quanto às propriedades determinadas nos ensaios químicos, o valor de perda ao fogo, MgO e Na_2O ficaram abaixo dos limites estipulados. A caracterização química do cimento utilizado é descrita na Tabela 6.5.

Tabela 6.5 – Caracterização química do cimento.

Material: Cimento CPV-ARI TOCANTINS				
Propriedades determinadas ensaios químicos		Valores encontrados	Limites	Norma
Perda ao fogo (%)		4,45	≤ 4,5	NBR 5733:1991
Resíduo insolúvel		1,26	≤ 1,0	
Trióxido de enxofre (SO_3) [1]		4,08	≤ 3,5	
Óxido de magnésio (MgO)		4,47	≤ 6,5	
Dióxido de silício (SiO_2)		18,56	-	
Óxido de ferro (Fe_2O_3)		3,58	-	
Óxido de alumínio (Al_2O_3)		4,13	-	
Óxido de cálcio (CaO)		58,46	-	
Óxido de cálcio livre (CaO)		1,3	-	
Álcalis totais	Óxido de sódio (Na_2O)	0,32	≤ 12	
	Óxido de potássio (K_2O)	1,25	-	
	Equiv. alcalino	1,14	-	
Álcalis solúveis em água	Óxido de sódio (Na_2O)	0,18	-	
	Óxido de potássio (K_2O)	1,11	-	
	Equiv. alcalino	0,91	-	
Sulfato de cálcio ($CaSO_4$)		6,94	-	

[1] O teor de trióxido de enxofre (SO_3) exigido pela NBR 5733 (ABNT, 1991) é de 3,5%, em massa, quando o percentual de C3A for menor que 8%, e quando o percentual de C3A for maior que 8%, o limite é de 4,5%.

6.3 CARACTERIZAÇÃO DO ADITIVO SUPERPLASTIFICANTE

As propriedades do aditivo superplastificante foram determinadas no Laboratório de Química do DCT de Furnas. O aditivo foi utilizado apenas na composição do Concreto de Alto Desempenho (CAD), com relação a/agl igual a 0,37, não sendo necessária a sua utilização no concreto convencional de relação a/agl igual a 0,60. Este aditivo, que tem como base o policarboxilato em meio aquoso, tem suas propriedades descritas na Tabela 6.6.

Tabela 6.6 – Propriedades do aditivo superplastificante, determinadas em Laboratório.

Resíduo sólido	38,83 %
Aspecto	Líquido
Cor	Castanho claro
Densidade	1,1 g/cm³
pH	4,4

6.4 CARACTERIZAÇÃO DOS AGREGADOS

6.4.1 Caracterização do agregado miúdo

A areia natural grossa quartzosa teve sua composição granulométrica caracterizada de acordo com a NBR NM 248 (ABNT, 2003a) no Laboratório do DCT de Furnas. Esta norma também orientou a determinação do valor da dimensão máxima e do módulo de finura. Este agregado teve sua massa específica determinada segundo os procedimentos descritos na NBR NM 52 (ABNT, 2003b), bem como a absorção de água prevista na NBR NM 30 (ABNT, 2001b). A caracterização do agregado miúdo é descrita na Tabela 6.7. A curva granulométrica deste agregado miúdo pode ser observada na Figura 6.3.

Tabela 6.7 – Caracterização do agregado miúdo.

Ensaio	NBR	Resultados[1]		
Massa específica	NBR NM 52: 2003	2,62 g/cm³		
Absorção de água	NBR NM 30: 2001	0,4 %		
Composição granulométrica	NBR NM 248:2003	Abertura (mm)	% Retida	
			Individual	Acumulada
		4,75	1,8 %	1,8 %
		2,34	4,6 %	6,4 %
		1,18	15,1 %	21,5 %
		0,6	33,7 %	55,2 %
		0,30	27,9 %	83,1 %
		0,15	12,4 %	95,5 %
		Fundo	4,6 %	100,1 %
		Módulo de Finura		2,63
		Dimensão Máxima		4,75 mm

[1] Valores médios de duas determinações.

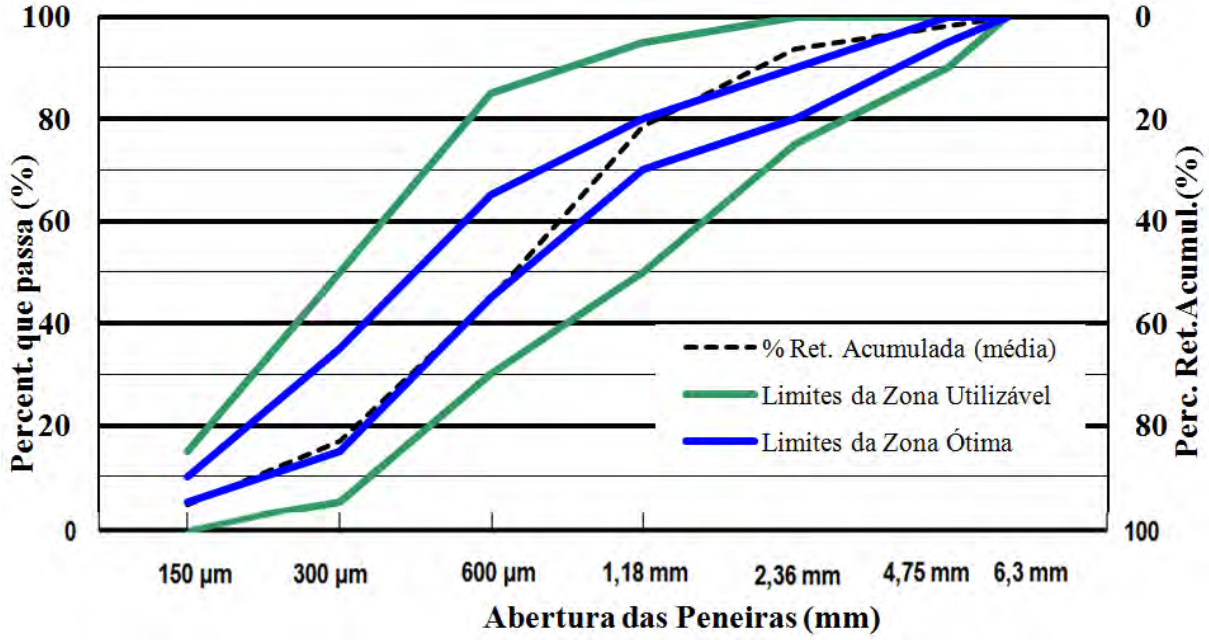

Figura 6.3 – Curva granulométrica do agregado miúdo.

Com base nos resultados, verificou-se que a areia empregada possui modulo de finura de 2,63 e dimensão máxima de 4,75 mm. A curva granulométrica deste agregado se encaixa quase que totalmente na zona ótima recomendada pela NBR 7211 (ABNT, 2005).

6.4.2 Caracterização do agregado graúdo

A brita de origem granítica utilizada foi caracterizada granulometricamente, no Laboratório do DCT de Furnas, de acordo com a NBR NM 248 (ABNT, 2003a). A massa específica e absorção de água foram determinadas segundo os procedimentos da NBR NM 53 (ABNT, 2003c). A caracterização do agregado graúdo é descrita na Tabela 6.8 e a curva granulométrica na Figura 6.4.

Tabela 6.8 – Caracterização do agregado graúdo.

Ensaio	NBR	Resultados[1]		
Massa específica	NBR NM 53: 2003	2,74 g/cm³		
Absorção de água		0,6 %		
Composição granulométrica	NBR NM 248:2003	Abertura (mm)	% Retida Individual	% Retida Acumulada
		25,4	0 %	0 %
		19	2 %	2 %
		12,5	58 %	60 %
		9,5	31 %	91 %
		6,3	7 %	98 %
		4,75	1 %	99 %
		Fundo	1 %	100 %
		Módulo de Finura		6,91
		Dimensão Máxima		19,00 mm

[1] Valores médios de duas determinações.

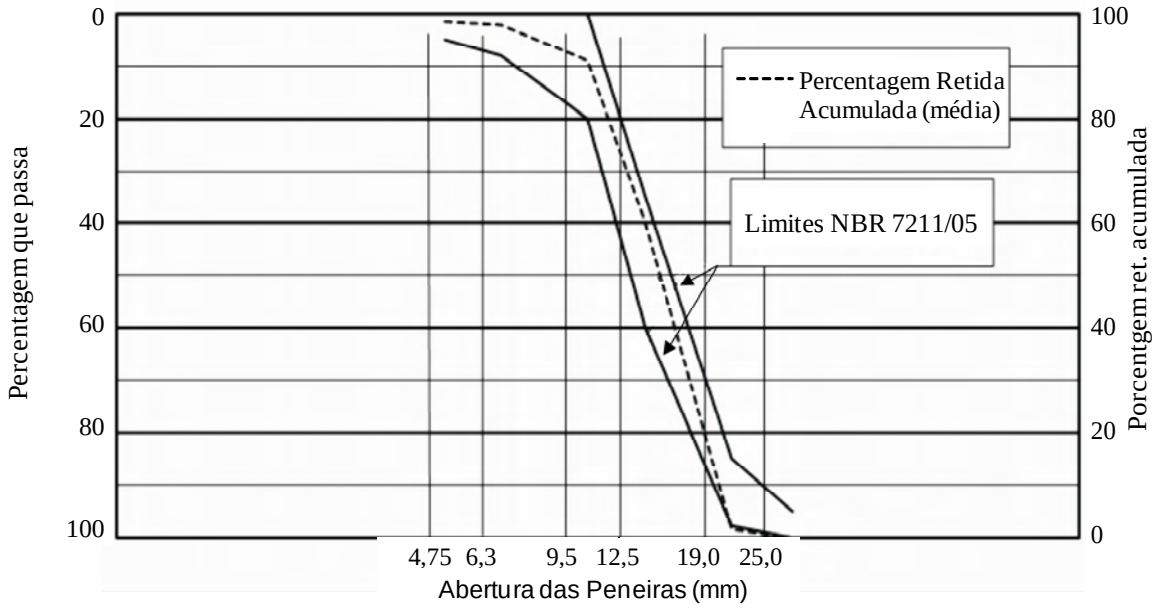

Figura 6.4 – Curva granulométrica do agregado graúdo.

Este agregado graúdo possui modulo de finura de 6,91 e dimensão máxima de 19,00 mm. A curva granulométrica deste agregado se encaixa totalmente na zona ótima recomendada pela NBR 7211 (ABNT, 2005).

6.5 PROPRIEDADES DO CONCRETO FRESCO

As dosagens dos concretos utilizados nesta pesquisa podem ser observadas no Item 5.4.5. Os valores da massa específica do concreto, determinada conforme a NBR 9833 (ABNT, 2008a), estão descritos na Tabela 6.9. Nesta tabela também podem ser observados os valores para o abatimento (NBR NM 67) e o teor de ar incorporado para o concreto fresco de acordo com a NBR NM 47 (ABNT, 2002a; 2002b).

Tabela 6.9 – Caracterização dos concretos no estado fresco.

AMOSTRA[1]	a/agl[2]	Massa Específica (kg/m³) NBR 9833:1987	Abatimento (mm) NBR NM 67:2002	Ar incorporado (%) NBR NM 47:2002
Referência	0,37	2.407	145	1,5
5%	0,37	2.407	128	1,6
10%	0,37	2.391	110	1,5
20%	0,37	2.374	75	1,5
Referência	0,60	2.349	110	1,5
5%	0,60	2.360	75	1,1
10%	0,60	2.358	75	1,0
20%	0,60	2.356	65	0,8

[1] Referência: Concreto de referência; 5%: concreto com substituição parcial de 5% do cimento por CBC residual; 10%: concreto com substituição parcial de 10% do cimento por CBC residual; 20%: concreto com substituição parcial de 20% do cimento por CBC residual.
[2] a/agl: Relação água / aglomerante; AGL: Aglomerante (C + CBC); C: Cimento Portland (CPV-ARI); CBC: cinza do bagaço de cana-de-açúcar residual.

A massa específica do concreto fresco não apresentou variação relevante para cada uma das dosagens. De modo geral, pode-se dizer que a massa específica do concreto fresco com a/agl igual a 0,37 diminui ligeiramente com a substituição do cimento Portland pela CBC residual. Fato este é justificável, em parte, pela diferença de massa específica entre o cimento Portland (3,11 g/cm³) e a CBC residual (2,40 g/cm³).

O abatimento do concreto fresco apresentou diferenças relevantes para os concretos com relação a/alg iguais a 0,37 e 0,60, pois o valor do abatimento reduziu para todo incremento na utilização da CBC residual em substituição parcial ao cimento Portland. Esta redução se deve, em parte, à granulometria da CBC residual que é um material duas vezes mais fino que o cimento Portland e sua elevada superfície específica (11.390 cm²/g), que tendem a adsorver uma maior quantidade de água. A redução da disponibilidade de água para amassamento compromete a trabalhabilidade do concreto fresco. A redução do abatimento também pode ser atribuída ao alto teor de carbono (perda ao fogo igual a 19,38%) da CBC residual.

O volume de ar incorporado para o concreto fresco de relação a/alg igual a 0,37, não apresentou diferenças em função da substituição de CBC residual, quando observados os valores absolutos. Porém, para o concreto de relação a/alg igual a 0,60, foram observadas diferenças no volume de ar incorporado com a substituição de CBC residual.

6.6 PROPRIEDADES DO CONCRETO ENDURECIDO

6.6.1 Resistência à compressão

Segundo a análise estatística dos resultados da resistência à compressão para concretos com relação a/agl de 0,37 e idade de 7, 28 e 91 dias, não foi observada diferença significativa entre os três teores de substituição e o concreto de referência (Figura 6.5).

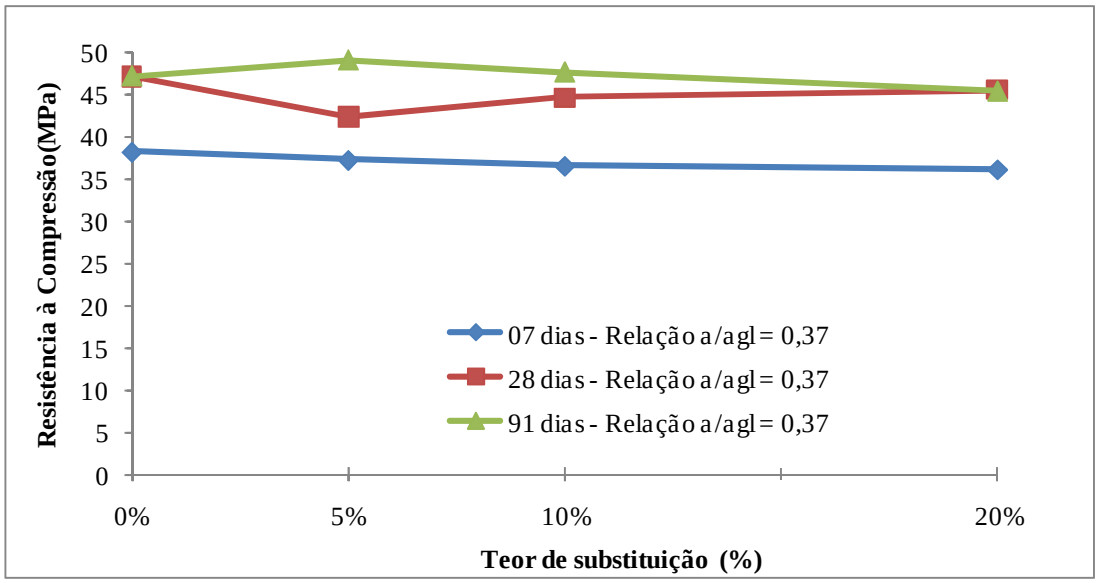

Figura 6.5 – Resistência à compressão do concreto com relação a/agl = 0,37.

Na Figura 6.6 é ilustrada a resistência à compressão para os concretos com relação a/agl de 0,60 em três idades. Aos 7 dias, apenas o concreto com 20% diferiu significativamente do concreto de referência (p=0,0087). Aos 28 dias não foi observada diferença significativa. O concreto com 20% apresentou diferença significativa dos demais para os 91 dias de idade.

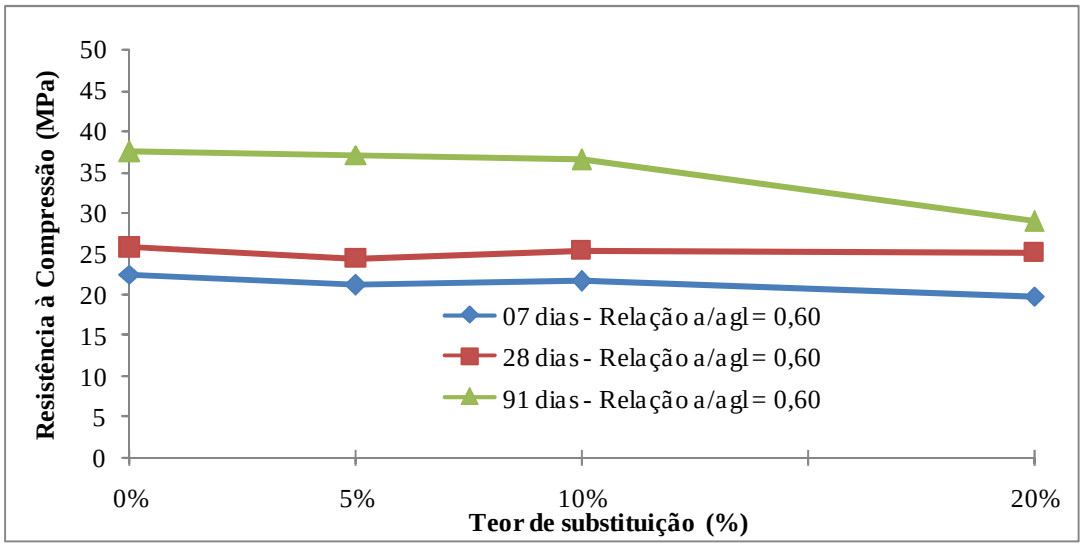

Figura 6.6 – Resistência à compressão do concreto com Relação a/agl = 0,60.

Os resultados para a resistência à compressão dos concretos com relação a/agl igual a 0,37 e 0,60 e para as idades de 7, 28 e 91 dias e os respectivos desvios padrões estão detalhados na Tabela 6.10.

Tabela 6.10 – Valores de resistência à compressão e desvio padrão para o concreto com Relação a/agl = 0,37 e 0,60, para as idades de 7, 28 e 91 dias (MPa).

a/agl[1]	Idade	Composição[2,3]				
		Referência	5%	10%	20%	P[4]
0,37	7 dias	38,22 ± 1,58^{a}	37,27 ± 3,28^{a}	36,56 ± 1,35^{a}	36,15 ± 0,99^{a}	0,6225
	28 dias	47,11 ± 1,04^{a}	42,36 ± 2,64^{a}	44,68 ± 2,17^{a}	45,52 ± 1,69^{a}	0,0936
	91 dias	47,22 ± 3,28^{a}	49,05 ± 3,57^{a}	47,65 ± 2,47^{a}	45,44 ± 1,60^{a}	0,5165
0,60	7 dias	22,47 ± 1,03^{a}	21,03 ± 0,47^{ab}	21,56 ± 0,53^{ab}	19,77 ± 0,58^{b}	0,0087
	28 dias	25,74 ± 1,34^{a}	24,36 ± 2,01^{a}	25,39 ± 1,55^{a}	25,01 ± 0,41^{a}	0,6937
	91 dias	37,38 ± 0,93^{a}	37,07 ± 0,40^{a}	36,44 ± 0,51^{a}	28,84 ± 1,10^{b}	< 0,0001

[1] a/agl: Relação água / aglomerante; AGL: Aglomerante (C + CBC); C: Cimento Portland (CPV-ARI); CBC: cinza do bagaço de cana-de-açúcar residual.
[2] Dados apresentados como média ± desvio padrão de 3 corpos-de-prova. Em uma mesma linha, médias com letras em comum, não diferem significativamente entre si a 5% de probabilidade pelo teste Tukey.
[3] Referência: Concreto de referência; 5%: concreto com substituição parcial de 5% do cimento por CBC residual; 10%: concreto com substituição parcial de 10% do cimento por CBC residual; 20%: concreto com substituição parcial de 20% do cimento por CBC residual.
[4] P: Nível de significância. Se P < 0,05 então a variação é significativa.

Para relação a/alg igual a 0,60, observou-se que a substituição de cimento Portland por CBC residual não afetou a resistência à compressão até o teor de 10%. A menor resistência do concreto com 20% de substituição se deve, em parte, à redução da contribuição do efeito microfiler para este teor de utilização da CBC residual. Com a redução para 80% do teor de cimento utilizado, ocorre uma diminuição da produção de produtos de hidratação que juntamente com a baixa reatividade química da CBC residual, observado pelo ensaio Chapelle modificado, contribuem para a redução da resistência à compressão axial.

Uma análise gráfica dos resultados de resistência à compressão para as três idades estudadas, bem com para as duas relações a/agl, é apresentada na Figura 6.7. Observa-se a forte tendência de redução da resistência à compressão axial à medida que aumenta a relação a/agl de 0,37 para 0,60.

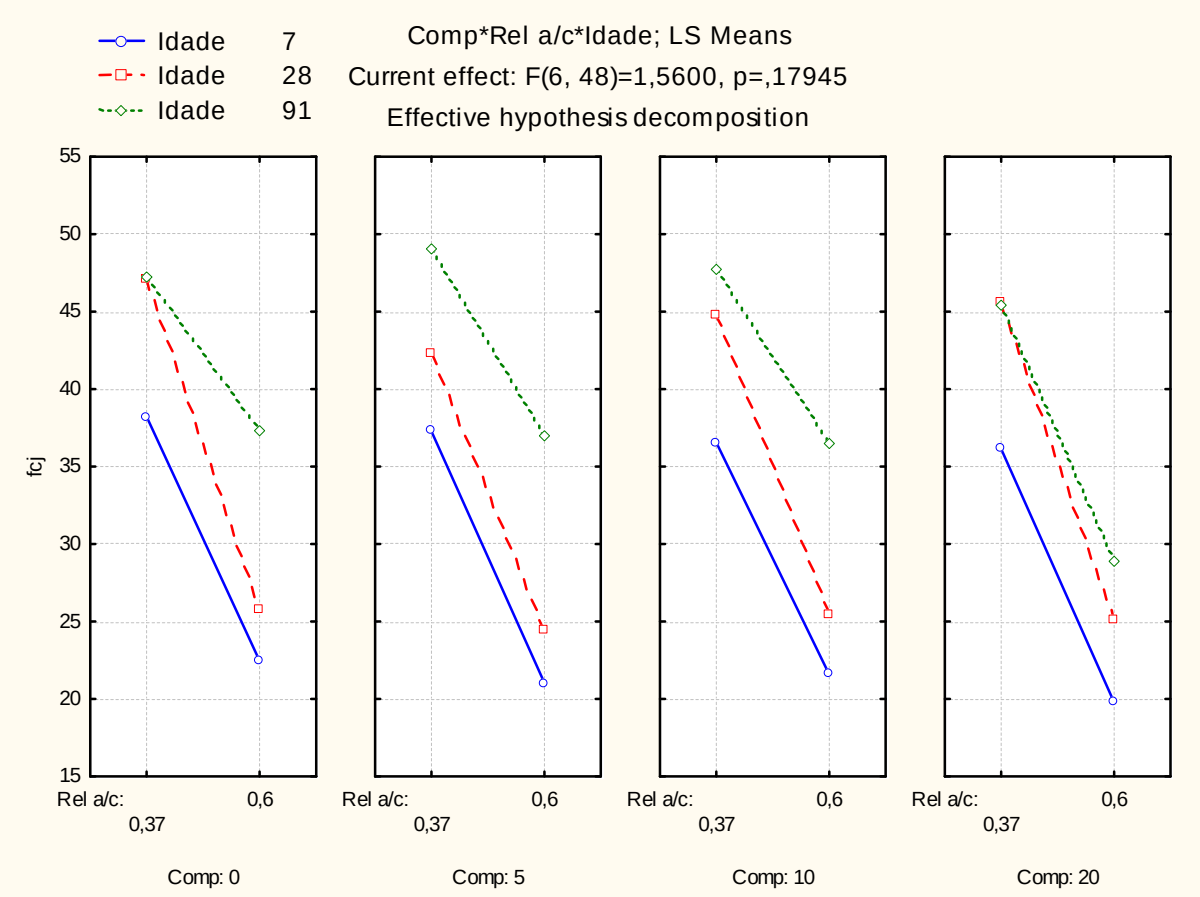

Figura 6.7 – Análise gráfica dos resultados de resistência à compressão.

6.6.2 Resistência à tração por compressão diametral

No ensaio de resistência à tração por compressão diametral, para ambas as relações a/agl, os valores encontrados não diferiram estatisticamente dos de referência (p>0,05), conforme Tabela 6.11. Embora, muito próximos, os valores encontrados possibilitaram observar que a maior resistência à tração, para o concreto com relação a/agl de 0,37, foi obtida com o teor de substituição de 20%. A semelhança estatística dos resultados na tração por compressão diametral é corroborado pela resistência à compressão axial, que apresentou resultados com comportamentos semelhantes aos 28 dias. Para o concreto com relação a/agl de 0,60, por sua vez, os teores de 0% e 5% apresentaram-se ligeiramente superiores aos demais, conforme ilustrado na Figura 6.8.

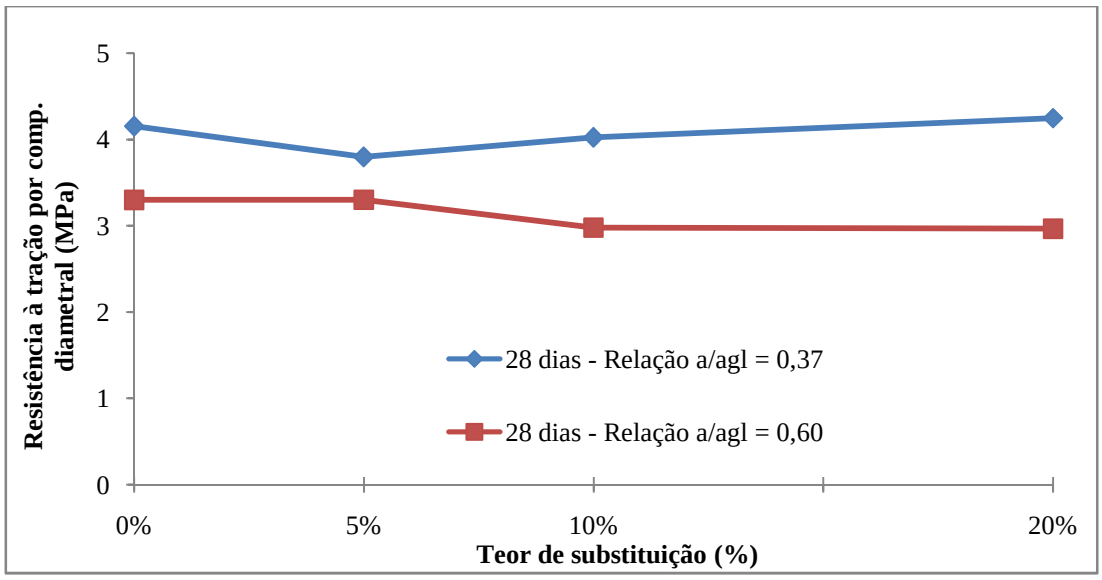

Figura 6.8 – Resistência à tração por compressão diametral (a/agl = 0,37 e 0,60).

Tabela 6.11 – Valores de resistência à tração e desvio padrão aos 28 dias (MPa).

a/agl[1]	Composição[2,3]				
	Referência	5%	10%	20%	P[4]
0,37	4,15 ± 0,24[a]	3,8 ± 0,10[a]	4,02 ± 0,18[a]	4,25 ± 0,30[a]	0,1403
0,60	3,30 ± 0,22[a]	3,30 ± 0,17[a]	2,98 ± 0,23[a]	2,97 ± 0,37[a]	0,2608

[1] a/agl: Relação água / aglomerante; AGL: Aglomerante (C + CBC); C: Cimento Portland (CPV-ARI); CBC: cinza do bagaço de cana-de-açúcar residual.
[2] Dados apresentados como média ± desvio padrão de 3 corpos-de-prova. Em uma mesma linha, médias com letras em comum, não diferem significativamente entre si a 5% de probabilidade pelo teste Tukey.
[3] Referência: Concreto de referência; 5%: concreto com substituição parcial de 5% do cimento por CBC residual; 10%: concreto com substituição parcial de 10% do cimento por CBC residual; 20%: concreto com substituição parcial de 20% do cimento por CBC residual.
[4] P: Nível de significância. Se P < 0,05 então a variação é significativa.

6.6.3 Módulo de elasticidade

O Módulo de elasticidade está relacionado com a estabilidade dimensional das estruturas de concreto sob carga. Por isso julgou-se necessário também a realização deste ensaio, na idade de 28 dias. Os concretos com relação a/agl de 0,60 apresentaram valores estatisticamente semelhantes, ou seja, bem próximos ao módulo de elasticidade do concreto de referência ($p>0,05$). Porém, para a relação a/agl de 0,37, os concretos apresentaram reduções significativas no módulo de elasticidade ($p<0,05$), em função da substituição parcial de CP V por CBC residual, para os teores de 10% e 20%, conforme o ilustrado na Figura 6.9 e Tabela 6.12.

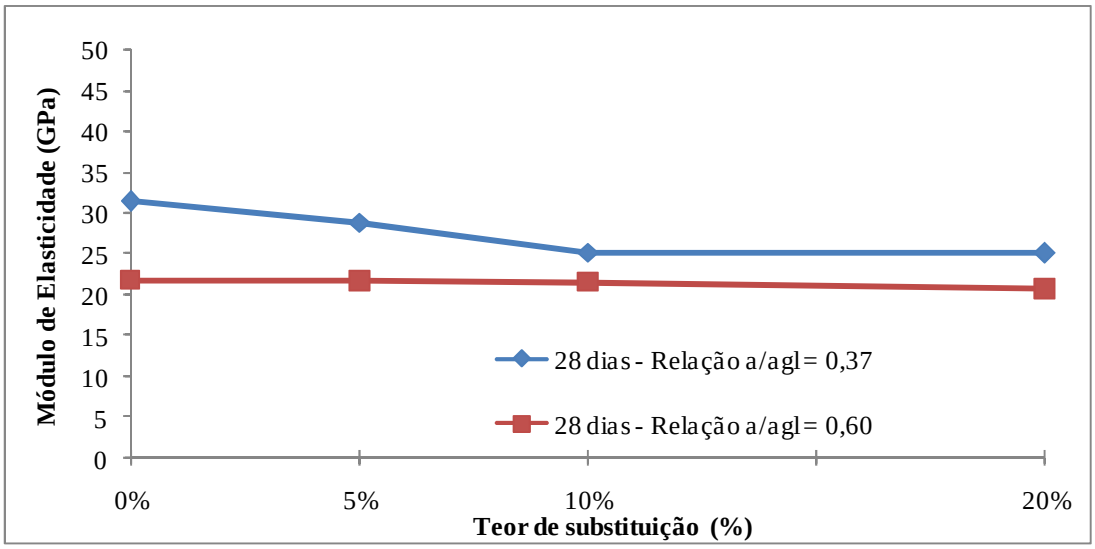

Figura 6.9 – Módulo de elasticidade (a/agl = 0,37 e 0,60).

Tabela 6.12 – Valores de módulo de elasticidade aos 28 dias (GPa).

a/agl[1]	Composição[2,3]				
	Referência	5%	10%	20%	P[4]
0,37	31,4 ± 2,35[a]	28,8 ± 0,76[a]	25,2 ± 1,10[b]	25,1 ± 0,46[b]	0,0013
0,60	21,90 ± 1,12[a]	21,6 ± 0,85[a]	21,60 ± 0,72[a]	20,7 ± 0,62[a]	0,4109

[1] a/agl: Relação água / aglomerante; AGL: Aglomerante (C + CBC); C: Cimento Portland (CPV - ARI); CBC: cinza do bagaço de cana-de-açúcar residual.
[2] Dados apresentados como média ± desvio padrão de 3 corpos-de-prova. Em uma mesma linha, médias com letras em comum, não diferem significativamente entre si a 5% de probabilidade pelo teste Tukey.
[3] Referência: Concreto de referência; 5%: concreto com substituição parcial de 5% do cimento por CBC residual; 10%: concreto com substituição parcial de 10% do cimento por CBC residual; 20%: concreto com substituição parcial de 20% do cimento por CBC residual.
[4] P: Nível de significância. Se P < 0,05 então a variação é significativa.

A norma NBR 6118 (ABNT, 2007), possibilita uma estimativa de cálculo para o valor de módulo de elasticidade, descrito na Equação 6.1. Utilizando esta equação foram comparados, na Tabela 6.13, os valores do ensaio do módulo de elasticidade encontrados para o concreto aos 28 dias, com os valores determinados teoricamente pela equação.

$$E_{ci} = 5600\sqrt{fck} \qquad \text{Eq. 6.1}$$

Onde:
E_{ci} = módulo de elasticidade (MPa);
fck = resistência característica do concreto (MPa).

Tabela 6.13 – Comparativos dos valores de módulo de elasticidade aos 28 dias.

Dosagem[1]	a/agl[2]	Módulo de elasticidade (GPa)		Relação
		Ensaio 28 dias	Norma NBR 6118	Ensaio / Norma
Referência	0,37	31,40	38,44	0,817
5%	0,37	28,80	36,45	0,790
10%	0,37	25,20	37,43	0,673
20%	0,37	25,10	37,78	0,664
Referência	0,60	21,90	28,41	0,771
5%	0,60	21,60	27,64	0,781
10%	0,60	21,60	28,22	0,765
20%	0,60	20,70	28,01	0,739

[1] Referência: Concreto de referência; 5%: concreto com substituição parcial de 5% do cimento por CBC residual; 10%: concreto com substituição parcial de 10% do cimento por CBC residual; 20%: concreto com substituição parcial de 20% do cimento por CBC residual;
[2] a/agl: Relação água / aglomerante; AGL: Aglomerante (C + CBC); C: Cimento Portland (CPV - ARI); CBC: cinza do bagaço de cana-de-açúcar residual.

Os valores do módulo de elasticidade encontrados nos ensaios foram menores que os teóricos, segundo a norma NBR 6118 (ABNT, 2007). Notou-se que, com o aumento do teor de CBC residual em substituição ao cimento Portland, as relações entre o módulo do ensaio aos 28 dias e o valor calculado foram reduzidas.

6.6.4 Absorção de água por capilaridade

O ensaio de absorção de água por capilaridade do concreto aos 28 dias pode ser observado na Tabela 6.14. Para este ensaio foram utilizados apenas os concretos com relação a/agl de 0,60, conforme descrito no programa experimental.

Tabela 6.14 – Valores da absorção por capilaridade (relação a/agl = 0,60).

Composição[1]	Absorção por capilaridade[2] (%)
Referência	1,01 ± 0,07[a]
5%	1,09 ± 0,26[a]
10%	0,75 ± 0,03[a]
20%	1,18 ± 0,23[a]
P	0,0780

[1] Referência: Concreto de referência; 5%: concreto com substituição parcial de 5% do cimento por CBC residual; 10%: concreto com substituição parcial de 10% do cimento por CBC residual; 20%: concreto com substituição parcial de 20% do cimento por CBC residual.
[2] Dados apresentados como média ± desvio padrão de 3 corpos-de-prova. Em uma mesma coluna, médias com letras em comum, não diferem significativamente entre si a 5% de probabilidade pelo teste Tukey.
[3] P: Nível de significância. Se P < 0,05 então a variação é significativa.

Os resultados de absorção capilar não apresentaram diferenças significativas, segundo a análise de variância ANOVA (p>0,05). Porém, um acréscimo mais relevante da absorção por capilaridade foi observada para o teor de substituição de 20% CBC residual, fato este que está de acordo com a redução da resistência à compressão para este teor.

O decréscimo da absorção por capilaridade para o teor de substituição de 10% indica uma provável presença de um ponto ótimo com melhor efeito de tamponamento dos poros. Os valores da absorção abaixo ou acima deste teor são superiores aos demais (menor resistência à percolação de água), tanto na presente pesquisa, quanto nos estudos de Cordeiro (2006) com uma CBC residual citada no Capítulo 3.

A absorção capilar após 72h em (kg/m²), foi de 4,16% ± 9,1 para o concreto de referência, 4,03% ± 2,2 para 10% de substituição de cinza residual do bagaço, 4,95% ± 4,8 para 15% e 6,03% ± 8,4 para 20%, segundo Cordeiro (2006). Ainda de acordo com este autor pode ser observado um acúmulo de água no decorrer do tempo para os concretos dosados com substituição de 15% e 20% de cinza residual, podendo assim comprometer a durabilidade destes concretos.

6.6.5 Absorção de água por imersão, índice de vazios e massa específica

Os valores da absorção de água por imersão, índice de vazios e massa específica do concreto endurecido aos 28 dias de cura podem ser observados na Tabela 6.15. Estes ensaios foram realizados em concretos com relação a/agl de 0,60.

Tabela 6.15 – Absorção por imersão, índice de vazios e massa específica (a/agl = 0,60).

Composição[1,2]	Absorção[3] (%)	Índice de vazios[3] (%)	Massa Específica (kg/dm³)		
			Seca	Após sat. e fervura	Real
Referência	7,91 ± 0,42[a]	17,43 ± 0,74[a]	2,20 ± 0,02[a]	2,38 ± 0,02[a]	2,67 ± 0,00[ab]
5%	7,70 ± 0,22[a]	17,11 ± 0,45[a]	2,22 ± 0,006[a]	2,39 ± 0,006[a]	2,68 ± 0,01[a]
10%	7,26 ±0,60[a]	16,11 ± 1,16[a]	2,22 ± 0,02[a]	2,38 ± 0,01[a]	2,65 ± 0,006[c]
20%	7,98 ±0,16[a]	17,51 ± 0,30[a]	2,20 ± 0,006[a]	2,37 ± 0,00[a]	2,66 ± 0,00[bc]
P[4]	0,1865	0,1546	0,2211	0,1299	0,0060

[1] Referência: Concreto de referência; 5%: concreto com substituição parcial de 5% do cimento por CBC residual; 10%: concreto com substituição parcial de 10% do cimento por CBC residual; 20%: concreto com substituição parcial de 20% do cimento por CBC residual.
[2] Dados apresentados como média ± desvio padrão de 3 corpos-de-prova. Em uma mesma coluna, médias com letras em comum, não diferem significativamente entre si a 5% de probabilidade pelo teste Tukey.
[3] Após saturação e fervura.
[4] P: Nível de significância. Se P < 0,05 então a variação é significativa.

A absorção por imersão não apresentou diferença significativa, em função dos teores de substituição do cimento Portland CPV pela CBC residual, de acordo com a análise de variância (p>0,05). Porém, um acréscimo mais relevante da absorção por capilaridade foi observada para o teor de substituição de 20% CBC residual, fato este que está de acordo com a redução da resistência à compressão para este teor.

O decréscimo da absorção por capilaridade para o teor de substituição de 10% indica uma provável presença de um ponto ótimo com melhor efeito de tamponamento dos poros. Os valores da absorção para os demais teores de substituição apresentaram resultados superiores ao teor de 10%, indicando uma menor resistência à percolação de água tanto na presente pesquisa, quanto nos estudos de Cordeiro (2006).

O índice de vazios não apresentou diferenças significativas para o concreto endurecido. O menor teor de vazios foi obtido com 10% de CBC residual seguido pelo teor de 5%. Esse resultado contribuiu para a afirmação que os melhores teores de substituição do cimento Portland pela CBC residual, para aprimoramento durabilidade do concreto, são de 10% e 5%.

O ensaio da massa específica real dos concretos se mostrou um ensaio preciso, uma vez que os desvios padrões foram menores que 0,01. Os resultados apresentaram diferença significativa, e o teor de 10%, que mais se diferiu do referência, apresentou redução de 0,02 kg/dm³. A massa específica do concreto endurecido tende reduzir com a incorporação de altos teores da CBC residual devido à sua menor massa específica (2,40g/cm³) em relação ao cimento (3,11g/cm³). Em contrapartida, para teores como 5%, o efeito de empacotamento por microfiler, pode superar a diferença entre as massas específicas dos aglomerantes, como comprovado nos ensaios de absorção por imersão, índice de vazios e permeabilidade do concreto endurecido.

6.6.6 Permeabilidade

A permeabilidade dos corpos-de-prova de concreto com dimensões de 15 cm de altura por 15 cm de diâmetro, moldados com relação a/agl = 0,60 pode ser observada na Tabela 6.16. As dimensões dos corpos-de-prova usuais para este ensaio são de 30 cm de altura e 30 cm de diâmetro, portanto os resultados da permeabilidade foram corrigidos quanto ao tamanho do corpo-de-prova, segundo metodologia do relatório da Cesp MCC 07. A determinação destes resultados teve como parâmetros a norma NBR 10786 (ABNT, 1989).

Tabela 6.16 – Permeabilidade do concreto aos 63 dias (a/agl = 0,60).

Composição[1]	Coeficiente de permeabilidade[2] (10^{-9} m/s)
	K[3]
Referência	$1,453 \pm 0,46^{a}$
5%	$0,282 \pm 0,35^{b}$
10%	$0,584 \pm 0,28^{ab}$
20%	$0,408 \pm 0,35^{b}$
P[4]	0,0173

[1] Referência: Concreto de referência; 5%: concreto com substituição parcial de 5% do cimento por CBC residual; 10%: concreto com substituição parcial de 10% do cimento por CBC residual; 20%: concreto com substituição parcial de 20% do cimento por CBC residual.
[2] Dados apresentados como média ± desvio padrão de 3 corpos-de-prova. Em uma mesma coluna, médias com letras em comum, não diferem significativamente entre si a 5% de probabilidade pelo teste Tukey.
[3] Resultados com correção da idade e tamanho do corpo-de-prova.
[4] P: Nível de significância. Se P < 0,05 então a variação é significativa.

A permeabilidade do concreto para os teores de substituição de 5% e 20% apresentaram diferenças significativas em relação ao concreto de referência, e proporcionaram coeficientes de permeabilidade inferiores. O teor de 10% não diferiu significativamente dos demais. A menor permeabilidade dos concretos com a adição da CBC residual ratifica o efeito microfiler que a cinza provoca no concreto e é condizente com a redução da absorção capilar e absorção por imersão do teor de 10% de substituição.

6.6.7 Resultados da carbonatação natural e acelerada no concreto

A profundidade de carbonatação foi determinada para os corpos-de-prova prismáticos na idade de 290 dias (Tabela 6.17) de acordo com os procedimentos descritos no programa experimental. Foram adotados dois ambientes para a comparação da carbonatação natural em ambiente de laboratório com a carbonatação acelerada em câmara com 100% de CO_2. Os corpos-de-prova de carbonatação acelerada, com relação a/agl igual a 0,37, podem ser observados na Figura 6.10.

Tabela 6.17 – Profundidade de carbonatação aos 290 dias (a/agl = 0,37).

Composição	Profundidade de carbonatação (mm)	
	Carbonatação natural (Ambiente de Laboratório)	Carbonatação acelerada (100% CO_2)
Referência	0,5	0,1
5%	0,9	3,9
10%	1,8	3,7
20%	1,9	2,7

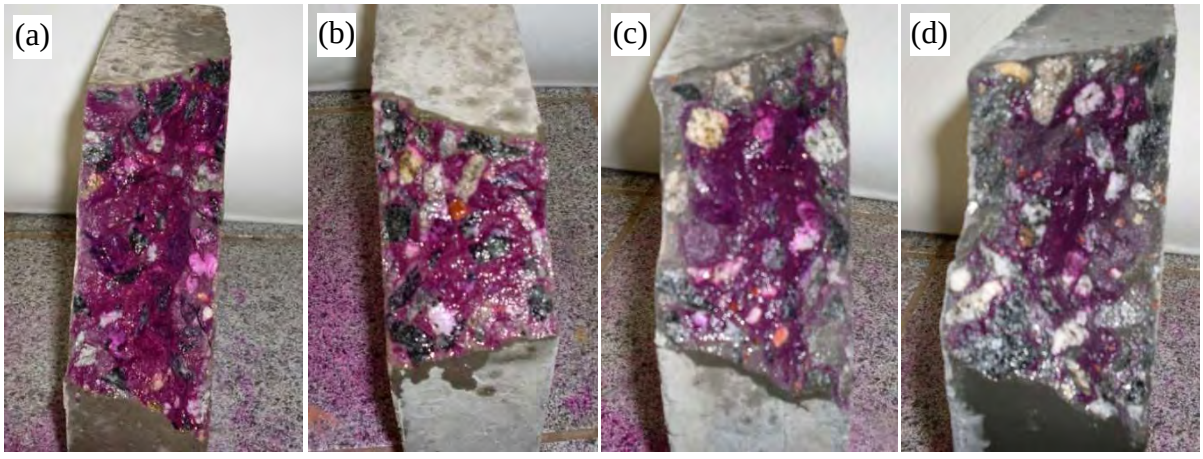

Figura 6.10 – Corpos de prova, a/agl = 0,37, nos teores de 0%, 5, 10 e 20%, respectivamente.

Na Tabela 6.18 são apresentados os valores do avanço da frente de carbonatação para os concretos com relação a/agl igual a 0,60. Os corpos-de-prova, parcialmente quebrados, receberam uma aplicação de fenolftaleína na região recém exposta. As regiões

com cor violeta na Figura 6.11 representam as áreas que não sofreram o efeito da carbonatação dos corpos-de-prova de carbonatação acelerada.

Tabela 6.18 – Profundidade de carbonatação aos 290 dias (a/agl = 0,60).

Composição	Profundidade de carbonatação (mm)	
	Carbonatação natural (Ambiente de Laboratório)	Carbonatação acelerada (100% CO_2)
Referência	25,4	28,0
5%	26,6	29,4
10%	27,1	33,0
20%	29,3	35,0

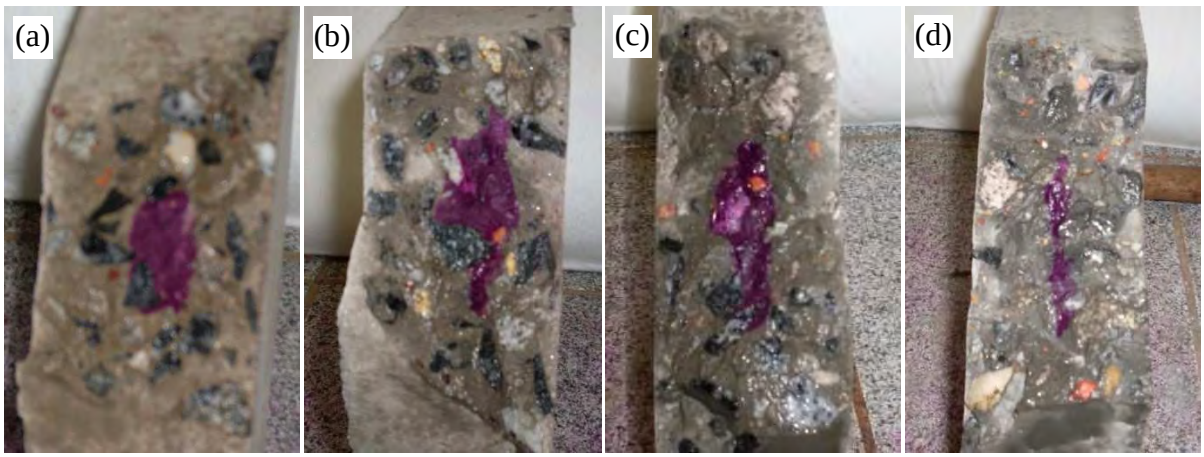

Figura 6.11 – Avanço da frente de carbonatação dos corpos-de-prova, a/agl = 0,60, nos teores de 0%, 5, 10 e 20%, respectivamente.

Os concretos com relação a/agl de 0,37 foram dosados com 566 kg/m³ de material aglomerante no concreto, enquanto os concretos com relação a/agl de 0,60 contaram com 367 kg/m³ de aglomerante. A maior disponibilidade de aglomerante para aquele concreto (54,22% superior) garante uma reserva alcalina que protege o concreto do efeito da carbonatação, o que justifica a expressiva diferença entre os valores apresentados nas Tabelas 6.17 e Tabela 6.18. Tanto na carbonatação ao ar livre quanto para a acelerada, notou-se um maior avanço da frente de carbonatação com a substituição do cimento Portland pela CBC residual, uma vez que, com a redução do cimento empregado há uma redução no $Ca(OH)_2$ formado e consequentemente no pH do concreto, favorecendo o efeito da carbonatação.

7 CONCLUSÕES

A partir da apresentação e análise dos resultados apresentados no capítulo 6, pode-se realizar algumas considerações quanto à utilização da cinza do bagaço da cana-de-açúcar (CBC) residual no concreto, válidas dentro das condições adotadas pela presente pesquisa. Em seguida, a fim de facilitar a continuidade de estudos das adições minerais, são apresentadas algumas sugestões de temas para pesquisas futuras.

7.1 CARACTERIZAÇÃO DA CBC RESIDUAL

A CBC residual atingiu uma granulometria adequada, de acordo com a granulometria indicada por Mehta e Monteiro (2008), após ser moída por 4 horas em moinho de bolas, o que contribuiu com o seu desempenho, superando o valor mínimo para o índice de atividade pozolânica com a cal e índice de atividade pozolânica com o cimento. Estes valores contribuíram com a intenção inicial de se trabalhar com a cinza residual direto da indústria sucroalcooleira e sem beneficiamento.

A CBC residual obtida apresentou um alto teor de perda ao fogo (19,38%) e estrutura basicamente cristalina. Estas características contribuíram para um valor abaixo do desejado em relação ao ensaio de atividade química pelo método de Chapelle modificado, 198 mg de CaO por grama de amostra, valor inferior ao mínimo de 330 mg de CaO.

7.2 CARACTERIZAÇÃO DO CONCRETO NO ESTADO FRESCO

O aumento do teor de CBC residual alterou as propriedades do concreto ainda no estado fresco, como o teor de ar incorporado e o abatimento. A redução do abatimento provavelmente ocorreu devido à finura da CBC residual, sua elevada superfície específica (11.390 cm^2/g) e ao alto teor de carbono, fatores estes que levam a uma maior retenção de água.

A massa específica do concreto fresco com relação a/agl igual a 0,37 diminuiu ligeiramente com a substituição do cimento Portland (3,11 g/cm^3) pela CBC residual (2,40 g/cm^3).

7.3 CARACTERIZAÇÃO DO CONCRETO NO ESTADO ENDURECIDO

De uma maneira geral, pode-se constatar por meio dos ensaios das propriedades mecânicas, que não ocorreram variações significativas nos resultados dos concretos com teores de substituição de até 10%. No ensaio de resistência à compressão, apenas para o teor de 20%, relação a/agl de 0,60 aos 91 dias, observou-se uma pequena queda do desempenho em função da baixa reatividade química da CBC residual e do menor volume de cimento empregado. Neste caso o valor da resistência atingiu 77,15% do valor do traço de referência, apesar de não existir diferença significativa entre os resultados de 28 dias.

Segundo os resultados do ensaio de resistência à compressão pode-se concluir que para a relação a/alg igual a 0,60 observou-se que a substituição de cimento Portland por CBC residual se mostrou eficiente até o teor de 10%. Para relações a/agl menores o valor da substituição pode chegar até 20%, sem perda significativa de resistência à compressão axial.

A resistência à tração por compressão diametral apresentou valores semelhantes para a substituição de 5%, 10% e 20% de CBC residual em relação ao concreto de referência (0% de substituição). Este comportamento se repetiu para ambas as relações a/agl.

O ensaio de módulo de elasticidade não sofreu alteração para a relação a/alg igual a 0,60, porém para os concretos com relação a/alg de 0,37, recomenda-se a substituição de até 5% de CBC residual, para que a redução do valor do módulo não supere 10%.

7.4 ENSAIOS DE DURABILIDADE

A absorção capilar e a absorção por imersão não foram alteradas em função do uso de CBC. Um decréscimo nos valores de absorção para o teor de substituição de 10% indica uma provável presença de um ponto ótimo e tamponamento dos poros.

O índice de vazios não foi influenciado pela substituição do cimento Portland pela CBC residual, porém a massa específica real dos concretos apresentou diferença significativa, destacando o teor de 10% com redução de 0,02 g/cm³ em função da diferença entre as massas específicas do cimento (3,11g/cm³) e da CBC residual (2,40 g/cm³).

A adição da CBC residual, material mais fino que o cimento Portland, proporcionou uma redução do coeficiente de permeabilidade do concreto para todos os teores de substituição utilizados (5%, 10% e 20%). A permeabilidade menor é atribuída ao efeito

microfiler provocado pela CBC no concreto e é condizente com a redução da absorção capilar e absorção por imersão.

A resistência à carbonatação do concreto é diretamente influenciada pela quantidade de cimento Portland utilizado no concreto. Os concretos com relação a/agl de 0,37 apresentaram pequenos avanços da frente de carbonatação para a carbonatação natural e acelerada, com valores menores que 2 mm e 4 mm respectivamente. Com a relação a/agl de 0,60 os valores dos avanços da frente de carbonatação foram da ordem de 10 vezes maior do que os de a/agl de 0,37. Em ambos os casos a substituição do cimento Portland pela CBC residual diminui a resistência ao efeito da carbonatação em relação ao concreto de referência.

7.5 CONCLUSÕES GERAIS

A CBC residual utilizada neste estudo apresentou desempenho satisfatório como insumo para a produção dos concretos estudados, podendo ser utilizada em substituição de parte do cimento Portland empregado em teores de até 10% para o concreto convencional e de alto desempenho. Este teor possibilitou uma manutenção no desempenho mecânico do concreto. Houve ganho de desempenho em relação aos ensaios de durabilidade (absorção capilar, absorção por imersão e permeabilidade) com a utilização da CBC, exceto para o ensaio de carbonatação.

Esta substituição traz também vantagens do ponto de vista ambiental, como a redução do consumo de cimento, menor geração de CO_2 pelo menor uso do cimento Portland e aproveitamento nobre de um resíduo agro-industrial.

7.6 SUGESTÕES PARA PESQUISAS FUTURAS

Estudo dos processos de produção da CBC residual nas indústrias sucroalcooleiras visando uma possível melhoria das propriedades da cinza durante a queima do bagaço, aumentando principalmente o tempo de queima e com resfriamento controlado, reduzindo desta forma o teor de perda ao fogo e aumentando a reatividade da cinza por meio da maior amorficidade.

Otimizar o processo de moagem do material, analisando outros tipos de moinho de maior escala, para a obtenção de partículas com diâmetro médio entre 5μm entre 8μm em circuito fechado.

Estudo da CBC de outras usinas no Estado de Goiás, que se apresenta como um grande produtor de cana, quarto maior produtor, e com mercado grande em expansão.

Análise da viabilidade econômica da fabricação de cimento Portland Composto com a adição de CBC residual provenientes das indústrias sucroalcooleiras.

Propõe-se que sejam realizados estudos envolvendo os efeitos da reação álcali-agregado em concreto e argamassa contendo adição de CBC e CBC residual.

Ensaios do concreto produzido com a CBC, quanto à resistência à flexão, retração hidráulica, permeabilidade ao oxigênio, técnicas eletroquímicas para probabilidade de corrosão de armaduras protegidas por concreto com a presença de CBC.

Utilizar a CBC residual em outros teores de substituição ao cimento Portland, comparando a cor obtida da argamassa ou concreto com e sem adição, a fim de estabelecer limites de utilização sem a interferência na cor do produto final obtido.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABCP. Associação Brasileira do Cimento Portland. **Guia básico de utilização do cimento Portland**: BT-106. 7 ed. São Paulo: ABCP, 2002. 28 p.

_____. **Fabricação do cimento Portland. Básico sobre o cimento.** 2008**.** Disponível em: <http://www.abcp.org.br/basico_sobre_cimento/fabricacao.shtml>. Acesso em: 20 set. 2008.

ABNT. Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR Norma MERCOSUL (NM) 18: Cimento Portland – Análise química – Determinação da perda ao fogo. Rio de Janeiro, 2004a.

_____. NBR NM 23: Cimento Portland e outros materiais em pó – Determinação de massa especifica. Rio de Janeiro, 2001a.

_____. NBR NM 30: Agregado miúdo – Determinação da absorção de água. Rio de Janeiro, 2001b.

_____. NBR NM 43: Cimento Portland – Determinação da pasta de consistência normal. Rio de Janeiro, 2002c.

_____. NBR NM 46: Agregados – Determinação do material fino que passa através da peneira 75 micrometro, por lavagem. Rio de Janeiro, 2003.

_____. NBR NM 47: Concreto - Determinação do teor de ar em concreto fresco - Método pressométrico. Rio de Janeiro, 2002b.

_____. NBR NM 52: Agregado miúdo – Determinação da massa específica e massa específica aparente. Rio de Janeiro, 2003b.

_____. NBR NM 53: Agregado graúdo – Determinação da massa específica e massa específica aparente e absorção de água. Rio de Janeiro, 2003c.

_____. NBR NM 67: Concreto – Determinação da consistência pelo abatimento do tronco de cone. Rio de Janeiro, 2002a.

_____. NBR NM 76: Cimento Portland – Determinação da finura pelo método de permeabilidade ao ar (Método de Blaine). Rio de Janeiro, 1998.

_____. NBR NM 248: Agregados – Determinação da composição granulométrica. Rio de Janeiro, 2003a.

_____. NBR 5732: Cimento Portland comum. Rio de Janeiro, 1991a.

_____. NBR 5733: Cimento Portland de alta resistência inicial. Rio de Janeiro, 1991.

_____. NBR 5735: Cimento Portland de alto-forno. Rio de Janeiro: ABNT, 1991c.

_____. NBR 5736: Cimento Portland pozolânico. Rio de Janeiro: ABNT, 1991d.

_____. NBR 5737: Cimento Portland Resistente a Sulfatos. Rio de Janeiro: ABNT, 1991.

_____. NBR 5739: Concreto – Ensaio de compressão de corpos-de-prova cilíndricos. Rio de Janeiro, 1994a.

_____. NBR 7215: Cimento Portland – Determinação da resistência à compressão – Método de ensaio. Rio de Janeiro, 1996.

_____. NBR 5751: Materiais pozolânicos – Determinação de atividade pozolânica – Índice de atividade pozolânica com cal. Rio de Janeiro, 1992.

_____. NBR 5752: Materiais pozolânicos – Determinação de atividade pozolânica com cimento Portland – Índice de atividade pozolânica com cimento. Rio de Janeiro, 1992b.

_____. NBR 6118: Projeto de estruturas de concreto – Procedimento. Rio de Janeiro, 2004.

_____. NBR 7211: Agregados para concreto – Especificação. Rio de Janeiro, 2005.

_____. NBR 7222: Argamassa e concreto – Determinação da resistência a compressão diametral de corpos-de-prova cilíndrico. Rio de Janeiro, 1994b.

_____. NBR 8522: Concreto – Determinação do módulo estático de elasticidade a compressão. Rio de Janeiro, 2008b.

_____. NBR 9779: Argamassa e concreto endurecidos – Determinação da absorção de água por capilaridade. Rio de Janeiro, 1995.

_____. NBR 9778: Argamassa e concreto endurecidos - Determinação da absorção de água por imersão - Índice de vazios e massa específica Rio de Janeiro, 1992b.

_____. NBR 9831: Cimento Portland destinado à cimentação de poços petrolíferos. Rio de Janeiro, 2006.

_____. NBR 9833: Concreto fresco - Determinação da massa específica, do rendimento e do teor de ar pelo método gravimétrico. Rio de Janeiro, 2008a. Versão corrigida 2009.

_____. NBR 10786: Concreto endurecido – Determinação do coeficiente de permeabilidade à água. Rio de Janeiro, 1989.

_____. NBR 11172: Aglomerantes de origem mineral. Rio de Janeiro, 1992a.

_____. NBR 11578: Cimento Portland composto. Rio de Janeiro, 1991b.

_____. NBR 12653: Materiais pozolânicos. Rio de Janeiro, 1992c.

_____. NBR 12989: Cimento Portland Branco. Rio de Janeiro, 1993.

_____. NBR 13116: Cimento Portland de Baixo Calor de Hidratação, 1994.
ALVES, J. D.; GOULART, B. C. **Atividade pozolânica da cinza da casca de Arroz**. In: REUNIÃO ANUAL DO IBRACON, 1981, São Paulo. Anais. São Paulo, 1981.p.M7-1-M7-2.

ALVES, M. C. M.; ANDRADE, P.; CINTRA, F. N. **Avaliação dos reflexos do protocolo de Kyoto no setor sucroalcooleiro.** In: SIMPÓSIO INTERNACIONAL – UNICAMP, em 30 de julho de 2004, Campinas. Disponível em: http://www.cori.unicamp.br/IAU/completos/Avaliacao%20dos%20Reflexos%20do%20Protocolo%20de%20Kyoto%20no%20Setor%20Sucroalcooleiro.doc. Acesso em 20/8/2009.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS (ASTM) E 104-51. **Standard Recommended Practice for Maintaining Constant Relative Humidity by Means of Aqueous Solutions.** ASTM, Philadelphia, EUA, 1971.

ARAÚJO, F. W. C. **Contribuição à viabilização da técnica de realcalinização do concreto carbonatado através da absorção/difusão de soluções alcalinas.** 2004. 147 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil). Curso de Mestrado em Engenharia Civil, Universidade Federal de Goiás, Goiânia, 2004.

BRASIL. Ministério de Minas e Energia. Empresa de Pesquisa Energética. **Balanço energético nacional 2007**. Rio de Janeiro: EPE, 2008. 53p.

BRASIL. Ministério de Minas e Energia. Empresa de Pesquisa Energética. **Balanço energético nacional 2010**. Rio de Janeiro: EPE, 2010. 276 p.

BORLINI, M. C.; MENDONCA, 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.

CEB. **Durability of Concrete Structures.** Report of CEB-RILEM International Workshop. Copenhague, Mai., 1983; também CEB-Bulletin D'Information, Nº 152, 1984.

COPERSUGAR. Cooperativa de Produtores de Cana-de-açúcar, Açúcar e Álcool do Estado de São Paulo. **Cana-de-açúcar.** 2009. Disponível em: <http://www.copersucar.com.br/institucional/por/academia/cana_acucar.asp>. Acesso em: 15 jun. 2009.

CORDEIRO, G. C. **Utilização de Cinzas Ultrafinas do Bagaço de Cinza de Cana-de-açúcar e da Casca de Arroz como Aditivos Minerais em Concreto.** 2006. 445 f. Tese (Doutorado em Engenharia Civil). Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2006.

CORDEIRO, G.C.; TOLEDO FILHO, R.D.; FAIRBAIRN, E.M.R. Use of ultra-fine sugar cane bagasse ash as mineral admixture for concrete. **Materials Journal**. v. 105. nº 5. Sept-Oct. 2008.

DANIELS, J.; ROACH, B. T. Taxonomy and evolution. In: HEINZ, D. J. **Sugarcane improvement through breeding**. Amsterdam: Elsevier, 1987, cap. 1, p. 7-84.

DASS, A. Pozzolanicity of rice husk ash. In: The 9th CIB Congress, Stocholm – CIB-83. To build and take care of what we have built with limited resources. **Building Materials and Components**, London, v.4, 1984, p. 85-96.

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

FIGUEIREDO, E. J. P. **Avaliação do desempenho de revestimentos para proteção da armadura contra a corrosão através de técnicas eletroquímicas:** contribuição ao estudo de reparo de estruturas de concreto armado. 1994. 423p. Tese (Doutorado) – CPGECC, Escola Politécnica de São Paulo – USP, São Paulo, 1994.

FIGUEIREDO, E. J. P.; Efeitos da Carbonatação e de Cloretos no Concreto. In: ISAIA, Geraldo Cechella. **Concreto: Ensino, Pesquisa e Realizações**. São Paulo: Editora Ibracon, 2005. V2. Cap. 27, p. 829-855.

FREITAS, E. S. **Caracterização da cinza do bagaço da cana-de-açúcar do município de Campos dos Goytacazes para uso na construção civil.** 2005. 97 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil). Universidade Federal Fluminense, Campo dos Goytacazes, 2005.

HELENE, P.; FIGUEIREDO, E. P. Introducción. In: **Manual de rehabilitación de estructuras de hormigón:** reparación, refuerzo y protección**.** CYTED – XV-F. 2003, Introducción, p. 21-36.

IBGE. INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA, 2010, **Pesquisa mensal de previsão e acompanhamento das safras agrícolas no ano civil.** Brasil – Julho 2010. Grupo de Coordenação de Estatísticas Agropecuárias - GCEA/IBGE, DPE, COAGRO, agosto de 2010. Disponível em: <ftp://ftp.ibge.gov.br/Producao_Agricola/ Levantamento_Sistematico_da_Producao_Agricola_[mensal]/Fasciculo/ >. Acesso em: 10 set. 2010.

ISAIA, G. C. **Efeito de misturas binárias e ternárias de pozolanas em concreto de elevado desempenho:** um estudo de durabilidade com vistas à corrosão da armadura. 1995. 280 f. Tese (Doutorado em Engenharia Civil). Escola Politécnica. Universidade de São Paulo, São Paulo, 1995.

ISAIA, G. C.; GASTALDINI, A. L. G. **Perspectivas ambientais e econômicas do concreto com altos teores de adições minerais: um estudo de caso.** Ambiente construído, Porto Alegre, Vol. 4, n. 2, p. 19 – 30, abril/junho 2004.

JALLES MACHADO. **Informações do site da Usina Jalles Machado.** Goianésia – Goiás, 2009. Disponível em: < http://www.usinajallesmachado.com.br/ma_cogeracao.htm>. Acesso em: 25 jul. 2009.

KAZMIERCZAK, C. S.; HELENE, P. R. L. **Análise e fatores que influenciam a velocidade de carbonatação em estruturas de concreto armado.** 93 dur001. IBRACON – Reunião Anual. Brasília. Controle de Qualidade do concreto. Processos construtivos em obras de Concreto. São Paulo: IBRACON, 1993. 14 p.

KAZMIERCZAK, C. S. **Contribuição para a análise da eficiência de películas aplicadas sobre estruturas de concreto armado com o objetivo de proteção contra carbonatação.** São Paulo, 1995. 168 p. Tese (Doutorado) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo.

LARA, P. L. O. **Análise da relação entre propriedades de transporte de água e os mecanismos de corrosão das armaduras.** Dissertação (Mestrado) – Curso de Mestrado em Estruturas e Construção Civil, Universidade de Brasília, Brasília. 2003. 154p.

LIMA, S. A.; SALES, A.; MORETTI, J. P.; ALMEIDA, F. C. R.; SANTOS, T. J. **Caracterização de concretos confeccionados com a cinza do bagaço da cana-de-açúcar.** In: 6º Congresso Internacional sobre Patologia e Reabilitação de Estruturas. 2010. Anais... Cordoba. 13p.

LORA, E. S.; ARRIETA, F. P.; CARPIO, R. C. Eletricidade a partir do bagaço de cana. In: MELLO, M. G. **Biomassa:** energia dos trópicos em Minas Gerais. Belo Horizonte: LabMídia, 2001, cap. 3, p. 59-81.

MACEDO, P. C. **Avaliação do desempenho de argamassas com adição de cinza do bagaço de cana-de-açúcar.** 2009. 114f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil). Universidade Estadual Paulista, São Paulo, 2009.

MANMOHAN, D.; MEHTA, P.K. **Influence of Pozzolanic Slag and Chemical Admixtures on Pore Size Distribution and Permeability of Hardened Cement Pastes," Cement, Concrete, and Aggregates**, Vol. 3, Nº 1, 1981, pp. 63-67.

MARTINES-FILHO, J.; BURNQUIST, H. L.; VIAN, C. E. F. Bioenergy and the rise of sugarcane based ethanol in Brazil. **Choices**, Darien, v. 21, n. 2, p. 91-96, 2006. Disponível em: < http://www.choicesmagazine.org/2006-2/tilling/2006-2-10.pdf>. Acesso em: 24 jun. 2009.

MAPA. Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento. **Projeções do Agronegócio Brasil - 2008/09 a 2018/19.** Assessoria de Gestão estratégica - AGE. 2009.

MEHTA, P. K. Properties of blended cements made from rice husk ash", **ACI Journal**, v. 74, n. 40, p. 440-442, 1977.

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

MONTEIRO, E. C. B. **Avaliação do método de extração eletroquímica de cloretos para reabilitação de estruturas de concreto com problemas de corrosão das armaduras.** Tese (Doutorado) – CPGECC, Escola Politécnica de São Paulo – USP, São Paulo. 2002. 211p.

NEVILLE, A. M. **Propriedades do concreto.** 2. ed. São Paulo: Editora Pini, 1997. 826 p.

OSAWA, C.C.; GONÇALVES, L.A.G.; RAGAZZI, S. **Titulação potenciométrica aplicada na determinação de ácidos graxos livres de óleos e gorduras comestíveis.** Química Nova, São Paulo, v.29, n.3, fev. 2006.

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

POWERS, T. C. **Structure and physical properties of hardened Portland cement paste**, Journal of American Ceramic Society, v. 41, n. 1. 1958. pp. 1-6

RÊGO, J. H. S. **Viabilidade técnica da utilização da cinza de casca de arroz produzida sem controle de temperatura como adição mineral ao cimento.** Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil). Escola de Engenharia Civil, Universidade Federal de Goiás, Goiânia, 2001. 182 f.

RÊGO, J. H. S. **As cinzas de casca de arroz (CCAs) amorfa e cristalina como adição ao concreto:** aspectos de microestrutura das pastas. Tese (Doutorado em Engenharia Civil). Universidade de Brasília, Brasília. 2004. 274 f.

RÊGO, J. H. S.; FIGUEIREDO, E. P.; NEPOMUCENO, A. A. **A utilização da cinza de casca de arroz residual (CCA residual) como adição mineral ao cimento em concretos.** 44° Congresso Brasileiro do Concreto, IBRACON 2002.

REGOURD, M. **Structure and behavior of slag Portland cement hydrates.** ICCC, 7th Proceedings. Paris, 1980, v. 1, p. 9-26.

RILEM. RÉUNION INTERNATIONALE DES LABORATOIRES D'ESSAIS ET DE RECHERCHES SUR LES MATÉRIAUX ET LES CONTRUCTIONS - CPC-18. **Measurement of hardened concrete carbonation depth**. Materials and Structures, 1988, p. 453-455.

SANTOS, R. V.; EVANGELISTA, A. R.; PINTO, J. C.; COUTO FILHO, C. C. C.; SOUZA, R. M. Composição química da cana-de-açúcar (Saccharum SPP.) e das silagens com diferentes aditivos em duas idades de corte. **Ciência e Agrotecnologia**, Lavras, v. 30, n. 6, p. 1184-1189, 2006.

SENSALE, G. R.; DAL MOLIN, D. C. C. **Estudio sobre la influencia de la incorporacion de puzolanas altamente reactivas em las propriedades del hormigon.** In: 5º Congreso iberoamericano de patologia de las construciones – 7º Congreso de control de calidad. 1999. Anais... MONTEVIDEO. CIB W 86Building Patology - CIB TG 40 Informal Settlement. v.1. p. 433 - 441.

SOUSA, L. R. L. **Viabilidade do uso de Cinzas de Bagaço de Cana-de-açúcar (CBC) residuais do estado de Goiás como adição mineral ao cimento portland.** 120f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil). Universidade Federal de Goiás, Goiânia. 2009.

STATSOFT, **Statistica** Stat Soft Inc., 1984-2007 (versão Demo). Tulsa, EUA.

SILVEIRA, A. A. **A utilização de cinza de casca de arroz com vistas à durabilidade de concretos:** estudo do ataque por sulfatos. 1996. 139 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil). Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 1996.

SIKA. **Construção:** manual técnico. 45. ed. São Paulo: Sika Brasil, 2005. 198 p.

SNIC. SINDICATO NACIONAL DA INDÚSTRIA DO CIMENTO. **Relatório anual de 2009**. Rio de Janeiro. 2010. 49p. Disponível em: <http://www.snic.org.br/pdf/relat2009-10web.pdf>. Acesso em: 23 nov. 2010.

TAYLOR, H. F. W. **Cement chemistry.** 2 ed. London: Thomas Telford. 1997. 459 p.

UNICA. UNIÃO DA INDÚSTRIA DE CANA-DE-AÇÚCAR. **Produção de cana-de-açúcar Brasil**. Disponível em: < http://www.unica.com.br/downloads/estatisticas/PROCESSAMENTO%20DE%20CANA%20BRASIL.xls>. Acesso em: 02 nov. 2010.

VIAN, C. E. F.; BELIK, W.; PAULILLO, L. F.; CORDER, L. M. **Perspectivas da Agroenergia no Brasil.** Grupo de Pesquisa – Instituições e Desenvolvimento Social no Agronegócio Rio Branco – Acre, 20 a 23 de julho de 2008. 20p. Disponível em: <http://www.sober.org.br/palestra/9/806.pdf >. Acesso em: 17 ago. 2009.

ZARDO, A. M.; BEZERRA, E. M.; MARTELLO, L. S.; SAVASTANO JÚNIO, H. **Utilização da cinza do bagaço de cana-de-açúcar como "filler" em compostos de fibrocimento.** In: I CONFERÊNCIA LATINO-AMERICANA DE CONSTRUÇÃO SUSTENTÁVEL X ENCONTRO NACIONAL DE TECNOLOGIA DO AMBIENTE CONSTRUÍDO. Entac. São Paulo, 2004. Disponível em:<http://www.fzea.usp.br/constrambi/producao_arquivos/utilizacao_da_cinza_de_bagaco.pdf>. Acesso em: 08 set 2008.

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação na (CIP)
GPT/BC/UFG

Silveira, Daniel Antônio.
S587i Influência da substituição parcial do cimento Portland pela cinza do bagaço de cana-de-açúcar (CBC) residual no concreto [manuscrito] / Daniel Antônio Silveira. - 2010.
xv, 109 f. : il., tabs.

Orientador: Prof. Dr. Enio Pazini Figueiredo; Co-orientador: Prof. Dr. João Henrique da Silva Rêgo
Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Goiás, Escola de Engenharia Civil, 2010.
Bibliografia.
Inclui lista de figuras, tabelas e abreviaturas.

1. Cimento Portland – Substituição – Cinza do bagaço de cana. 2. Cimento Portland. 3. Cinza do bagaço de cana. I. Título.

CDU: 666.942:664.113