UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO NORTE
CENTRO DE TECNOLOGIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL

Zodínio Laurisa Monteiro Sampaio

ANÁLISE DO COMPORTAMENTO MECÂNICO DE CONCRETOS PRODUZIDOS COM INCORPORAÇÃO DE CINZA DO BAGAÇO DA CANA-DE-AÇÚCAR DE VARIEDADES SP911049, RB92579 E SP816949

Natal
2013

UFRN / Biblioteca Central Zila Mamede
Catalogação da Publicação na Fonte

Sampaio, Zodínio Laurisa Monteiro.

Análise do comportamento mecânico de concretos produzidos com incorporação de cinza do bagaço da cana-de-açúcar de variedades SP911049, RB92579 e PS816949. / Zodínio Laurisa Monteiro Sampaio. – Natal, RN, 2013.

134 f. : il.

Orientador: Prof. Dr. Paulo Alysson Brilhante Faheina de Souza.

Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal do Rio Grande do Norte. Centro de Tecnologia. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil.

1. Concreto – Comportamento mecânico – Dissertação. 2. Cana-de-açúcar – Cinza do bagaço - Dissertação. 3. Cana-de-açúcar – Variedade - Dissertação. 4. Indústria sucroalcooleira – Dissertação. I. Souza, Paulo Alysson Brilhante Faheina de. II. Universidade Federal do Rio Grande do Norte. III. Título.

RN/UF/BCZM CDU 666.97

Zodínio Laurisa Monteiro Sampaio

ANÁLISE DO COMPORTAMENTO MECÂNICO DE CONCRETOS PRODUZIDOS COM INCORPORAÇÃO DE CINZA DO BAGAÇO DA CANA-DE-AÇÚCAR DE VARIEDADES SP911049, RB92579 E SP816949

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil, da Universidade Federal do Rio Grande do Norte, como requisito parcial à obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil.

Orientador: Prof. Dr. Paulo Alysson Brilhante Faheina de Souza

Natal
2013

ZODÍNIO LAURISA MONTEIRO SAMPAIO

ANÁLISE DO COMPORTAMENTO MECÂNICO DE CONCRETOS PRODUZIDOS COM INCORPORAÇÃO DE CINZA DO BAGAÇO DA CANA-DE-AÇÚCAR DE VARIEDADES SP911049, RB92579 E SP816949

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-graduação, em Engenharia Civil, da Universidade Federal do Rio Grande do Norte, como requisito parcial à obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil.

BANCA EXAMINADORA

_____

Prof. Dr. Paulo Alysson Brilhante Faheina de Souza – Orientador (UFRN)

_____

Prof[a]. Dr[a]. Maria das Vitórias Vieira Almeida de Sá – (UFRN)

_____

Prof. Dr. Edilberto Vitorino de Borja – (IFRN)

Natal, 20 de novembro de 2012.

ANÁLISE DO COMPORTAMENTO MECÂNICO DE CONCRETOS PRODUZIDOS COM INCORPORAÇÃO DE CINZA DO BAGAÇO DA CANA-DE-AÇÚCAR DE VARIEDADES SP911049, RB92579 E SP816949

Zodínio Laurisa Monteiro Sampaio

Orientador: Prof. Dr. Paulo Alysson Brilhante Faheina de Souza

RESUMO

O concreto é o segundo produto mais consumido do mundo e a incorporação da Cinza do Bagaço da Cana-de-açúcar (CBC) a este material pode apresentar soluções para o aproveitamento de subprodutos de outros setores, reduzindo assim o impacto ambiental. O objetivo geral dessa dissertação concentra-se em analisar o comportamento mecânico dos concretos que sofreram a adição de CBC de três diferentes espécies de cana-de-açúcar, mediante ensaios de consistência, resistência à compressão, porosidade total, absorção, índice de vazios e Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV). Foram confeccionados 13 corpos de prova para o concreto padrão e para cada teor de incorporação de CBC (10%, 20% e 30%) das três variedades coletadas, totalizando 130 amostras de concreto. Foi empregado o traço 1:2:3 (cimento:areia:brita) em relação a massa do cimento com um fator água/cimento de 0,532 e 1% de aditivo Tec Mult 400 também baseado na massa do cimento. De acordo com os resultados obtidos na presente pesquisa, concluiu-se, que a variedade da cana-de-açúcar, utilizada na produção das CBC, influenciou no comportamento mecânico dos concretos resultantes. Todos os concretos com adição de CBC apresentaram uma redução de no mínimo 10% nas propriedades relacionadas a permeabilidade e um incremento na resistência à compressão de no mínimo 16% em relação ao concreto padrão aos 28 dias.

Palavras-chave: Concretos; Cinza do bagaço de cana-de-açúcar; variedade de cana-de-açúcar; Indústria Sucroalcooleira.

ANALYSIS OF THE MECHANICAL BEHAVIOR OF CONCRETES MADE BY COMBINING ASH OF THE BAGASSE OF THE SUGAR-CANE OF VARIETIES SP911049, RB92579 AND SP816949

Zodínio Laurisa Monteiro Sampaio

Adviser: Prof. Dr. Paulo Alysson Brilhante Faheina de Souza

ABSTRACT

Concrete is the second most consumed product in the world and the incorporation of the Sugar Bagasse Ash (SBA) into this material can provide solutions for the utilization of by-products from other industries, thus reducing the environmental impact. The general aim of this dissertation focuses on analyzing the mechanical behavior of concrete with addition of SBA from three different species of sugar cane, through tests of consistency, compressive strength, porosity, absorption, voids and Scanning Electron Microscopy (SEM). Were prepared 13 specimens for each specific pattern and level of incorporation of SBA (10%, 20% and 30%) of the three varieties collected, totaling 130 samples of concrete. The trait was employed 1:2:3 (cement: sand: aggregates) in relation to the cement mass with a water / cement ratio of 0.532 and 1% additive Tec 400 Mult also based on the weight of cement. According to the results obtained in this study, it was concluded that the variety of cane sugar, used in the production of the CBC, influenced the mechanical behavior of the resulting concrete. All concrete with addition of SBA, reported a reduction of at least 10% in the properties related to permeability and an increase in the compressive strength of at least 16% compared to standard concrete at 28 days.

Keywords: Concrete; Sugar Bagasse ash; variety of sugar cane and Alcohol Industry.

AGRADECIMENTOS

A Deus por estar ao meu lado e me dar forças, saúde, paz e perseverança.

Aos meus pais, Emília E. M. T. Monteiro e Fernando Gomes, por me incentivarem sempre a seguir em frente.

Aos meus irmãos, peças fundamentais na minha vida.

À minha amada esposa, Claudia Sampaio pelo amor, apoio e compreensão.

À toda minha família, pela credibilidade e incentivo ao meu trabalho e pela compreensão de minha ausência em tantos momentos importantes.

À minha querida amiga, Silone Pegado Gomes, pelo apoio e dedicação imensurável na fase final desse trabalho.

Aos meus queridos amigos, que sempre estiveram do meu lado e acreditaram em mim, em especial ao Amindo Correia Gomes, Heitor Ivan Barbosa, Jesuíno Albino, Camila D. Georg e a todos os outros colegas do PEC-G.

À Universidade Federal do Rio Grande do Norte, instituição que me formou desde a graduação, a minha eterna gratidão.

À CAPES, pelo apoio financeiro.

Ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, coordenada pelo Professor Olavo Francisco dos Santos Júnior, pela oportunidade e estímulo;

Ao Professor Paulo Alysson Brilhante Faheina de Souza, pela orientação desta pesquisa.

Ao Bruno G. Gouveia, pelo apoio na fase inicial do trabalho.

As professoras, Maria das Vitórias e Jaquelígia Brito, pelas valiosas contribuições acadêmicas.

À Fazenda Extrema, na pessoa de Anderson J. Brilhante Faheina de Souza, pelo fornecimento das cinzas.

Aos Técnicos de Laboratório Materiais de Construção da UFRN, Francisco Braz e Sandro R. S. Andrade, pela dedicação e empenho durante a realização dos ensaios.

À Rafaella Xavier, pelos serviços e simpatia ao longo do Mestrado;

Aos Laboratórios da UFRN de: Cimentos, NUPRAR e PPGCEM, pela disponibilização de equipamentos para a realização de alguns ensaios.

A todos que me apoiaram, de maneira direta ou indireta, muito obrigado.

SUMÁRIO

Lista de Figuras		viii
Lista de Tabelas		x
Lista de Equações		xii
Lista de Siglas e Abreviaturas		xiii
1	Introdução	01
2	Fundamentação teórica	05
2.1	Concreto	05
2.1.1	Tipos de concreto	06
2.1.2	Propriedades do concreto	07
2.1.2.1	Propriedades do concreto fresco	07
2.1.2.1.1	Consistência	09
2.1.2.1.2	Trabalhabilidade	09
2.1.2.2	Propriedades do concreto endurecido	11
2.1.2.2.1	Massa específica	11
2.1.2.2.2	Resistência à compressão	11
2.1.2.2.3	Permeabilidade e absorção	14
2.1.3	Considerações acerca dos processos de produção do concreto	16
2.1.4	Microestrutura e macroestrutura do concreto	17
2.2	Aglomerante	20
2.2.1	Cimento	20
2.2.1.1	Composição química do cimento	22
2.2.1.2	Hidratação do cimento Portland	25
2.2.1.3	Tipos de cimento	30
2.3	Agregados	32
2.4	Adições minerais	35
2.5	Cana-de-açúcar	41
2.5.1	A utilidade do bagaço da cana-de-açúcar	44
2.5.2	A cinza do bagaço da cana-de-açúcar	45
2.5.3	Aplicabilidade da cinza do bagaço da cana-de-açúcar como aditivo	51
3	Procedimento experimental	56
3.1	Planejamento experimental	58
3.1.1	Escolha do traço	58
3.1.2	Cálculo dos quantitativos	58
3.2	Caracterização dos materiais	60
3.2.1	Cimento	60
3.2.1.1	Ensaio de início de pega	61
3.2.1.2	Ensaio de expansibilidade	61
3.2.1.3	Ensaio de finura	62
3.2.1.4	Ensaio de resistência do cimento	62
3.2.1.5	Ensaio de massa específica real (Lê Chatelier com querosene)	63
3.2.2	Areia	63
3.2.2.1	Massa específica real e massa unitária	64
3.2.2.2	Composição granulométrica	65
3.2.3	Brita	65
3.2.3.1	Massa específica real e massa unitária	65
3.2.3.2	Composição granulométrica	65

3.2.4	Água	66
3.2.5	Aditivo	66
3.2.6	Cinza do bagaço da cana-de-açúcar	67
3.2.6.1	Granulometria	69
3.2.6.2	Massa específica real	71
3.2.6.3	Massa unitária	71
3.2.6.4	Fluorescência de raios X (FRX)	71
3.2.6.5	Difração de Raio X (DRX)	72
3.2.6.6	Pozolanicidade	72
3.2.6.7	Ensaio de Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV)	72
3.2.7	Concreto	73
3.2.7.1	Ensaios do concreto no estado fresco	75
3.2.7.1.1	Consistência	75
3.2.7.2	Cura	75
3.2.7.3	Ensaios do concreto no estado endurecido	75
3.2.7.3.1	Porosidade, absorção, índice de vazios e massa específica real	75
3.2.7.3.2	Resistência à compressão axial	77
3.2.7.3.3	Análise microestrutural	77
4	Resultados e discussões	79
4.1	Caracterização dos materiais	79
4.1.1	Cimento	79
4.1.1.1	Ensaio de início de pega	79
4.1.1.2	Ensaio de expansibilidade	80
4.1.1.3	Ensaio de finura	80
4.1.1.4	Resistência à compressão	80
4.1.1.5	Ensaio de massa específica real	81
4.1.2	Areia	81
4.1.2.1	Composição granulométrica	81
4.1.2.2	Massa específica real e massa unitária	83
4.1.3	Brita	83
4.1.3.1	Composição granulométrica	83
4.1.3.2	Massa específica real e massa unitária	85
4.1.4	Cinza do bagaço da cana-de-açúcar	85
4.1.4.1	Composição granulométrica	85
4.1.4.2	Granulometria a laser	88
4.1.4.3	Massa específica real e massa unitária	91
4.1.4.4	Fluorescência de raios X	91
4.1.4.5	Difração de raios X	93
4.1.4.6	Pozolanicidade	95
4.1.4.7	Análise microestrutural	96
4.1.5	Concreto	106
4.1.5.1	Ensaio de consistência	106
4.1.5.2	Ensaio de absorção, índice de vazios e porosidade total	107
4.1.5.3	Ensaio da Massa específica real	110
4.1.5.4	Ensaio da Resistência à compressão	111
4.1.5.5	Análise microestrutural do concreto	116
5	Considerações finais	122
5.1	Sugestões para trabalhos futuros	123
	Referências	124

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1	Influência do fator água/cimento no coeficiente de permeabilidade do concreto	15
Figura 2.2	Seção transversal de um corpo-de-prova de concreto	18
Figura 2.3	Microestrutura do concreto: zona de transição matriz-agregado	19
Figura 2.4	Microestrutura do concreto: matriz da pasta do cimento	19
Figura 2.5	Distribuição dos componentes numa partícula de clínquer	24
Figura 2.6	Micrografia eletrônica de varredura de uma pasta de cimento Portland com 3 dias de idade mostrando os cristais de $Ca(OH)_2$ e a estrutura fibrosa formada pelo C-S-H	26
Figura 2.7	Morfologia fibrosa do C-S-H com três dias de idade	26
Figura 2.8	As três fases do processo de hidratação	27
Figura 2.9	Libertação de calor durante a hidratação do cimento	27
Figura 2.10	Efeito da temperatura de queima na reatividade da CBC, utilizando o método de Chapelle modificado	40
Figura 2.11	Colorações de CBC	41
Figura 2.12	Mapa de produção do Setor Sucroenergético de 2008	42
Figura 2.13	Montanha de bagaço de cana-de-açúcar	45
Figura 2.14	Morfologia das partículas da cinza de biomassa de cana-de-açúcar.	47
Figura 2.15	Processo de geração de cinzas	49
Figura 3.1	Organograma do Procedimento Experimental	57
Figura 3.2	Corpos de prova (10x5cm) do ensaio de resistência do cimento	62
Figura 3.3	Variedades de cana-de-açúcar	67
Figura 3.4	Obtenção das CBC	70
Figura 4.1	Resistência a Compressão do Cimento	81
Figura 4.2	Curva granulométrica do agregado miúdo	82
Figura 4.3	Curva granulométrica da brita	84
Figura 4.4	Curva granulométrica da cinza A	87
Figura 4.5	Curva granulométrica da cinza B	87
Figura 4.6	Curva granulométrica da cinza C	88
Figura 4.7	Granulometria a laser da cinza A	89
Figura 4.8	Granulometria a laser da cinza B	89
Figura 4.9	Granulometria a laser da cinza C	90
Figura 4.10	DRX cinza A	93
Figura 4.11	DRX cinza B	94
Figura 4.12	DRX cinza C	94
Figura 4.13	Resistência à compressão das argamassas com as cinzas	96
Figura 4.14	MEV da cinza A	97
Figura 4.15	MEV da cinza B	97
Figura 4.16	MEV da cinza C	98
Figura 4.17	Pontos escolhidos (Spectrum 1 e 2) na imagem de MEV da cinza A para análise de EDS	99
Figura 4.18	Spectrum 1 EDS da Cinza A	100
Figura 4.19	Spectrum 2 EDS da Cinza A	100
Figura 4.20	Pontos escolhidos (Spectrum 1 e 2) na imagem de MEV da cinza B para análise de EDS	101
Figura 4.21	Spectrum 1 EDS da Cinza B	102
Figura 4.22	Spectrum 2 EDS da Cinza B	103
Figura 4.23	Pontos escolhidos (Spectrum 1 e 3) na imagem de MEV da cinza C para análise de EDS	104
Figura 4.24	Spectrum 1 EDS da Cinza C	105
Figura 4.25	Spectrum 2 EDS da Cinza C	105
Figura 4.26	Ensaio de consistência dos concretos	106

Figura 4.27	Variação da absorção aos 28 dias com aumento dos teores de CBC	108
Figura 4.28	Variação do índice de vazios aos 28 dias com aumento dos teores de CBC.....	108
Figura 4.29	Variação da porosidade total aos 28 dias com aumento dos teores de CBC.....	109
Figura 4.30	Variação da massa específica real com o aumento dos teores das CBC.....	110
Figura 4.31	Resistência à compressão dos concretos aos 7 dias com a incorporação de 10, 20 e 30% de variedades de CBC.....	111
Figura 4.32	Resistência à compressão dos concretos aos 28 dias com a incorporação de 10, 20 e 30% de variedades de CBC.....	112
Figura 4.33	Resistência à compressão dos concretos aos 91 dias com a incorporação de 10, 20 e 30% de variedades de CBC.....	112
Figura 4.34	Variação da resistência à compressão das CBC em função das idades.....	115
Figura 4.35	Microestruturas da pasta do concreto sem e com CBC.....	117
Figura 4.36	Microestrutura da pasta do concreto com CBC com aumento de 3000X.....	118
Figura 4.37	Microestruturas da pasta do concreto sem e com CBC (5000X).....	119

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1	Abatimento recomendado para diferentes tipos de obras.....	09
Tabela 2.2	Índices de consistência do concreto em função de diferentes tipos de obras e condições de adensamento.....	09
Tabela 2.3	Resistência relativa aproximada do concreto segundo a influência do tipo de cimento.....	13
Tabela 2.4	Resistência média do concreto em MPa em função da relação água/cimento para vários tipos de cimento brasileiro.....	13
Tabela 2.5	Resistência relativa em relação à idade.....	14
Tabela 2.6	Relação entre o fator água/cimento e idade para a impermeabilidade do concreto.....	15
Tabela 2.7	Fatores que influenciam a porosidade, a permeabilidade e a absorção.....	16
Tabela 2.8	Compostos e abreviações dos óxidos.....	22
Tabela 2.9	Proporção de óxidos nos cimentos Portland.....	22
Tabela 2.10	Compostos principais constituintes do cimento Portland.....	23
Tabela 2.11	Características dos componentes do Clínquer Portland.....	24
Tabela 2.12	Principais produtos presentes na pasta do cimento Portland.....	29
Tabela 2.13	Nomenclatura dos cimentos Portland.....	31
Tabela 2.14	Teores dos componentes de cimento Portland.....	32
Tabela 2.15	Propriedades dos agregados de acordo com as condicionantes.....	34
Tabela 2.16	Produção da cana-de-açúcar no Brasil.....	43
Tabela 2.17	Composição de cinzas do bagaço da cana-de-açúcar, em termos determinados por Borja et al. (2010), Cordeiro (2006), Massazza (2004), Goyal et al. (2007) e Martirena Hernández et al. (1998).....	47
Tabela 2.18	Resíduos gerados pela cana-de-açúcar.....	50
Tabela 3.1	Formulação dos concretos.....	59
Tabela 3.2	Quantitativo de corpo-de-prova por traço.....	59
Tabela 3.3	Volume total do concreto produzido por traço.....	60
Tabela 3.4	Quantidade de materiais e quantitativos para os ensaio.....	60
Tabela 3.5	Dados técnicos do aditivo superplastificante TecMult.....	66
Tabela 3.6	Características agroindustriais das variedades de cana-de-açúcar..	68
Tabela 3.7	Variedades de CBC e respectiva nomenclatura atribuída.....	69
Tabela 4.1	Ensaio de início de pega do cimento Portland.....	79
Tabela 4.2	Resistência à Compressão do cimento.....	80
Tabela 4.3	Frações correspondentes a cada tamanho do agregado miúdo.....	82
Tabela 4.4	Módulo de finura do agregado miúdo.....	82
Tabela 4.5	Ensaio de massa específica real e massa unitária.....	83
Tabela 4.6	Composição granulométrica do agregado graúdo.....	84
Tabela 4.7	Módulo de finura do agregado graúdo.....	84
Tabela 4.8	Resultados do ensaio de massa específica real e unitária do agregado graúdo.....	85
Tabela 4.9	Granulometria cinza A (SP911049).....	86
Tabela 4.10	Granulometria cinza B (RB92579).....	86
Tabela 4.11	Granulometria cinza C (SP816949).....	88
Tabela 4.12	Comparativo do módulo de finuras das variedades de cinzas.....	88
Tabela 4.13	Comparativo da granulometria a laser das cinzas.....	90
Tabela 4.14	Valores médios dos ensaios de massa específica real e massa unitária.....	91
Tabela 4.15	Fluorescência de raios X das CBC.....	92

Tabela 4.16	Resistência à compressão das argamassas com as cinzas.....	95
Tabela 4.17	Elementos detectados no Spectrum 1da Cinza A.....	99
Tabela 4.18	Elementos detectados no Spectrum 2 da Cinza A.....	100
Tabela 4.19	Elementos detectados no Spectrum 1 da Cinza B.....	102
Tabela 4.20	Elementos detectados no Spectrum 2 da Cinza B.....	102
Tabela 4.21	Elementos detectados no Spectrum 1 da Cinza C.....	104
Tabela 4.22	Elementos detectados no Spectrum 3 da Cinza C.....	105
Tabela 4.23	Resultados das principais propriedades que influenciam no comportamento mecânico dos concretos com adição das variedades de cinzas.....	120

LISTA DE EQUAÇÕES

Equação 2.1 08
Equação 2.2 25
Equação 2.3 37
Equação 3.1 62
Equação 3.2 63
Equação 3.3 64
Equação 3.4 64
Equação 3.5 76
Equação 3.6 76
Equação 3.7 76
Equação 3.8 76

LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS

AA – Argamassa com Cinza A

AB – Argamassa com Cinza B

ABCP - Associação Brasileira de Cimento Portland

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas

AC – Argamassa com Cinza C

AP – Argamassa Padrão

ASTM – American Society for Testing and Materials

CA – Concreto com Cinza A

CAD – Concreto de Alto Desempenho

CAERN - Companhia de Águas e Esgotos do Rio Grande do Norte

CB – Concreto com Cinza B

CBC – Cinza do Bagaço de cana-de-açúcar

CC – Concreto com Cinza C

CCA – Cinza da Casca de Arroz

CH – Hidróxido de Cálcio

CIESP – Centro das Indústrias do Estado de São Paulo

CONAB – Companhia Nacional de Abastecimento

CP – Concreto Padrão

C-S-H – Silicatos de Cálcio Hidratados

CTGAS-ER - Centro de Tecnologia do Gás e Energias Renováveis

DRX – Difração de Raio X

EDS – Espectrografia por Dispersão de Energias

ENBRI – European Network of Building Research Institutes

FIESP – Federação das Indústrias do Estado de São Paulo

FRX – Fluorescência de Raios X

IBGE – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística

ICDD – International Center for Diffraction Data

IPCC – Intergovernmental Panel on Climate Change

LNEC E 477 – Laboratório Nacional de Engenharia Civil (Portugal) Especificação 477

MAPA – Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento

MEV – Microscopia Eletrônica de Varredura

NBR – Norma Brasileira

NIPE – Núcleo Interdisciplinar de Planejamento Energético

NTI – Núcleo de Tecnologia Industrial

NUPRAR – Núcleo de Processamento Primário e Reuso de Água Produzida e Resíduos

PIB – Produto Interno Bruto

RB – República do Brasil

SP – São Paulo

UNICA – União da Indústria de Cana-De-Açúcar

1. Introdução

Esta dissertação aborda, em seu transcorrer, a interessante relação acerca da incorporação da cinza do bagaço da cana-de-açúcar (CBC) no concreto, visando à melhoria das propriedades mecânicas do concreto, como também a destinação adequada do subproduto da indústria sucroalcooleira.

Nas últimas décadas, notou-se um aumento gradativo de descarte de diferentes resíduos no meio ambiente, bem como problemas oriundos da escassez de matérias-primas naturais no ramo da construção civil. Esses fatores vêm impulsionando a pesquisa universitária, centros acadêmicos, institutos e empresas no âmbito de alternativas específicas e estudos sobre o aproveitamento de resíduos industriais como novos materiais, na tentativa de reduzir o seu impacto ambiental.

A utilização de materiais alternativos como a escória, a cinza volante, a cinza de casca de arroz e a sílica ativa, como também suas combinações, podem produzir concretos com características melhoradas (NEVILLE, 1997).

No entanto, torna-se necessário refletir acerca da utilização desses resíduos no concreto, pois os mesmos devem atender as especificações técnicas com menor custo possível, sem comprometer a qualidade final do produto.

O uso de resíduos industriais no concreto como a CBC pode apresentar soluções para o aproveitamento de subprodutos de outros setores, podendo-se obter um produto final com melhor desempenho (CORDEIRO et al, 2009).

Diante disso, constatou-se também na atualidade, uma valorização de alguns materiais, que outrora eram classificadas como resíduos de produção, devido à evolução de processos de busca de utilização de novas adições. São exemplos desses materiais a escória de alto forno moída e sílica ativa, oriundas respectivamente das indústrias de ferro gusa e de ligas de ferro-silício metálico.

As pesquisas, com o intuito de adequar o uso da adição destes produtos ao concreto, os transformaram em materiais de grande valor comercial. Na mesma tendência, têm-se pesquisado novas adições minerais, economicamente viáveis,

onde pode-se citar a cinza da casca de arroz (CCA), o CBC dentre vários outros (PRUDÊNCIO JR. ET AL, 2003).

A grande vantagem em se utilizar produtos advindos de subprodutos industriais, principalmente quando essa utilização diminui a poluição, é o aumento da consciência de preservação do meio ambiente e a promoção do crescimento sustentável das empresas que estejam direta e indiretamente envolvidas na área da construção civil.

O uso do resíduo CBC pode permitir não só vantagens técnicas, como também benefícios sociais relacionados com a redução de descartes de resíduos no meio ambiente, incentivando a inovação em pesquisas que averiguam as potencialidades desses materiais.

No Brasil, a utilização da CBC nos concretos torna-se extremamente relevante, já que esse país é um dos maiores produtores mundiais de cana-de-açúcar. Percebe-se que a plantação de cana-de-açúcar possui uma grande participação na economia brasileira, pois o setor é responsável por 3,65% do PIB Brasileiro (SOUZA et al. 2007).

De acordo com o Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento - MAPA (2009) as projeções para o agronegócio de 2008/2009 até 2018/2019 da área plantada de cana-de-açúcar no Brasil deve aumentar para 6,0 milhões de hectares e naturalmente aumentando também a quantidade de resíduos gerados por esta indústria, sem uma destinação definida até ao momento.

A região Norte/Nordeste vem sofrendo uma evolução constante em termos de produção da cana-de-açúcar. De acordo com a União da Indústria da Cana-De-Açúcar (UNICA), a exportação de cana-de-açúcar na região Norte/Nordeste entre os anos de 2000 para 2008, passou de 1.231,9 para 3274,7 milhares de toneladas, resultando num aumento de quase 166%.

Acerca da indústria cimenteira, pode-se considerar que ela é um dos grandes vilões no que diz respeito ao consumo de recursos e emissão de CO_2 na atmosfera. A utilização do concreto, que é caracterizado por ser um dos materiais mais empregados no mundo, acentua a poluição ambiental, pois segundo Malhotra e Mehta (1996), para cada tonelada de clinquer (principal constituinte do cimento) produzido é liberado aproximadamente uma tonelada de gás carbônico. Capello

(2012) afirma que a produção de cimento contribui com cerca de 5% das emissões antropogênicas de CO_2, responsáveis pelo efeito estufa. As estimativas indicam para o concreto um crescimento de 327% a 457% em 2030, comparado com a produção de 1990 (IPCC 2007).

A construção civil por ser o ramo da atividade tecnológica que mais consome recursos naturais, torna-se também o mais indicado para absorver os rejeitos sólidos (AHMED, 1996 apud COIMBRA et al, 2004).

Kraushaar e Ristinen (1988) asseguram que se a concentração de CO_2 na atmosfera for duplicada, uma elevação de 2° a 3 °C ocorrerá na temperatura média do planeta. Desse modo, essa elevação acarretaria a modificação do padrão das intempéries climáticas e promoveria o degelo de parte da calota polar, provocando assim o aumento do nível dos mares e a submersão de várias regiões costeiras de todo o mundo. Os autores avaliam que se não acontecer uma redução sensível das emissões, a duplicação da concentração de CO_2 ocorrerá em 2050.

Nessa perspectiva, há a necessidade de minimizar o impacto ambiental, regendo as pesquisas em tecnologia dos concretos para a utilização de materiais alternativos, obtidos pela reciclagem de subprodutos industriais, com objetivo de preservar o ambiente, como propõe CINCOTTO (1984).

Com relação à cana-de-açúcar, pode-se considerar que o aumento da demanda e o ataque constante das pragas nas plantações têm forçado o governo e os produtores a investir cada vez mais na modificação genética desse produto agrícola, tanto para acelerar o crescimento, como torná-lo mais forte e resistente. A consequência disso é uma ampla variedade de tipos de cana-de-açúcar com características químicas e físicas distintas.

Partindo do pressuposto especificado por essas pesquisas, este trabalho científico retratará a hipótese de que a variedade do tipo de cana-de-açúcar interfere consideravelmente nas propriedades da cinza. Esse fator consequentemente afetará as qualidades do concreto após a incorporação da cinza na produção deste. Diante disso, ao observar o uso das cinzas de variedades de cana-de-açúcar distintas poder-se-á avaliar as características mecânicas dos concretos com teores variados destas adições.

Esse estudo justifica-se pela relevância de analisar e entender quais são os benefícios ocasionados às propriedades mecânicas dos concretos que são submetidos à inserção da cinza do bagaço da cana-de-açúcar.

A relevância dessa dissertação se dá também ao fato de, até o momento, observar a carência de estudos que enfatizem a influência das diferentes variedades da cana utilizadas na produção dessas cinzas, nas propriedades do concreto.

É relevante ainda este estudo, porque o uso mais nobre desse material pode promover vantagens ambientais através de uma destinação sustentável desse resíduo.

Almeja-se que esse estudo seja uma contribuição para o conhecimento científico, tendo em vista que a ciência está sempre em processo de construção e evolução. Espera-se que outras pesquisas sejam desenvolvidas e que possam se acoplar a esta, na perspectiva de provocar a ampliação do conhecimento acerca dos concretos.

Diante do exposto o objetivo geral dessa dissertação concentra-se em analisar o comportamento mecânico dos concretos com a adição de CBC de tipos distintos de cana-de-açúcar, comparando três amostras de CBC de variedades SP 911049, RB 92579 e SP 816949.

Quanto aos objetivos específicos, a proposta desse estudo está em: a) analisar a influência dos tipos de CBC na consistência, resistência à compressão, porosidade total, índice de vazios e absorção; e, b) conferir a influência dos teores de adição de CBC, na resistência à compressão dos concretos em função das idades de 7, 28 e 91 dias.

Assim, espera-se que os resultados obtidos no presente trabalho forneçam embasamento ao meio técnico, com o intuito que ocorra novos avanços na aplicação desse material.

2. Fundamentação Teórica

2.1 Concreto

O concreto é, depois da pedra, da argila e da madeira, um dos materiais de construção mais antigos que a humanidade conhece. Os romanos produziam um tipo de concreto com cinza vulcânica (pozolana natural) e cal que permitia a moldagem e a soldagem de peças formadas por grandes blocos de pedra. Pode-se afirmar que teve a sua origem, em 1756, quando John Smeaton utilizou pela primeira vez uma argamassa calcinada na construção do farol de Eddystone na Inglaterra (SANTOS 2008).

Por definição o concreto é o material resultante da mistura, em determinadas proporções, de um aglomerante - cimento Portland - com um agregado miúdo – geralmente areia lavada - um agregado graúdo - geralmente brita - e água, podendo conter adições e aditivos que podem influenciar no seu desempenho (ARAUJO; RODRIGUES; FREITAS, 2000).

A água e o cimento quando recém misturados formam a pasta que com o tempo endurece adquirindo resistência mecânica e aderindo as partículas do agregado (GIAMMUSSO, 1992).

A proporção entre os materiais usados, ou seja, a dosagem, também denominado de “traço”, precisa suprir os quesitos de resistência, trabalhabilidade e durabilidade preestabelecidas pela obra.

De acordo com Gabrich (2008), uma dosagem adequada desses materiais, resultará num concreto cujas propriedades propiciarão as seguintes vantagens:

a) Elevada resistência, comparada aos outros materiais usados na construção civil (exemplo: aço e madeira);

b) Versátil, no seu estado plástico, o concreto pode ser moldado em diversas formas e tamanho de acordo com as necessidades de cada obra, ao endurecer torna-se uma pedra artificial com o formato desejado;

c) Baixo custo, derivado dos materiais que o constituem serem de fácil obtenção e de custo relativamente baixo.

Graças a essas características, o concreto é o segundo material mais consumido pela humanidade, superado apenas pela água.

Desde a fabricação até a fase em que desempenha funções estruturais, o concreto passa por dois estados diferentes: concreto fresco e concreto endurecido. O primeiro é definido como concreto ainda no estado plástico e capaz de ser compactado por métodos normais, já o segundo é definido como concreto endurecido que já conta com uma certa resistência (COSTA; APPLETON, 2002).

Mediante Costa e Appleton (2002), o endurecimento do concreto começa poucas horas após o seu fabrico e aos 28 dias de idade atinge cerca de 60 a 90% da sua resistência final, dependendo do tipo de cimento e do tipo de cura utilizado.

2.1.1 Tipos de concreto

Mehta e Monteiro (1994) afirmam que os concretos classificam-se segundo a massa específica em:

a) Concreto leve (a massa específica é inferior a 1800 kg/m³);

b) Concreto normal ou concreto convencional (a massa específica entre 2300 e 2400 kg/m³); e,

c) Concreto pesado (a massa específica é superior a 3200 kg/m³).

Esses autores ainda salientam que de acordo com a resistência à compressão esse material classifica-se em:

a) Concreto de baixa resistência cuja resistência à compressão é menor que 20Mpa;

b) Concreto de resistência moderada com resistência à compressão compreendida entre 20 e 40Mpa; e finalmente em,

c) Concreto de alta resistência com superiores a 40 MPa.

Com o intuito de suprir as deficiências apresentadas pelo concreto ou para atender as especificações da obra, tem-se recorrido à adição de outros materiais que melhoram as propriedades do concreto tanto no estado fresco como no endurecido constituindo assim os concretos especiais.

Souza (2007) ressalta que a descoberta e a utilização de concretos especiais, tais como o concreto de alto desempenho (CAD), concreto projetado, concreto protendido, concreto com adições de fibras, concreto leve, concreto pesado, dentre outros, representa uma evolução expressiva nas técnicas de execução do concreto ou na própria composição, a partir de inserção de um novo material.

Com o avanço das técnicas, condições de utilização e a elevação da exigência da sociedade por estruturas cada vez maiores e mais complexas nas quais os materiais têm que satisfazer as especificações de desempenho ainda mais rigorosas que as atuais, ocorreu um impulso com relação às pesquisas no desenvolvimento de novos concretos que têm as suas propriedades melhoradas com adições de materiais, muitas vezes oriundas de resíduos agroindústrias (cinza da casca de arroz e a cinza do bagaço de cana-de-açúcar).

2.1.2 Propriedades do concreto

Avelino (2011) alega que o concreto deve possuir propriedades de plasticidade tais, que quando recém-misturado, facilitem o seu transporte, lançamento e adensamento e, quando endurecido, atendam às exigências de resistência à compressão, à tração, módulo de deformação, entre outras.

2.1.2.1 Propriedades do concreto fresco

De acordo com Araújo et al. (2000), o concreto no estado fresco apresenta as seguintes propriedades: a consistência, a trabalhabilidade, a plasticidade e o poder de retenção da água.

2.1.2.1.1 Consistência

O maior ou menor grau de fluidez do concreto fresco é denominado de Consistência e é diretamente relacionada com a mobilidade da massa fluida (ARAUJO ET AL., 2000).

O principal fator que influi na consistência é, sem dúvida, o teor água/materiais secos (A%), pois ele estabelece em termos de porcentagem a relação entre o peso da água e o peso dos materiais secos (ver Equação 2.1)

$$A\% = \frac{Pag}{Pc + Pm} x100 \quad (2.1)$$

Logo, temos: Pag = peso da água, Pc = peso do cimento, Pm = peso do agregado miúdo + agregado graúdo.

Com o aumento da quantidade de água, a mistura fresca amolece-se ganhando mais plasticidade e melhores condições de ser manuseada (GIAMMUSSO, 1992).

O tipo de obra, o espaçamento entre as paredes das formas e a distribuição e quantidade da armadura delas, impõem que a consistência do concreto seja apropriada, ou seja, essa consistência deve oferecer plasticidade tal que permita a moldagem e o deslizamento entre os ferros da armadura, sem que ocorra separação de seus componentes. (ARAUJO ET AL., 2000).

No Brasil, o processo de determinação de consistência mais utilizado é o ensaio de abatimento do tronco de cone, conhecido como o Slump Test. Ele é caracterizado por sua facilidade e simplicidade de execução na obra.

A NBR 6118/2007, estabelece que a consistência do concreto deve adequar-se as dimensões da peça a ser concretada, com a distribuição da armadura no seu interior e com os processos de lançamento e adensamento utilizados.

Nas Tabelas 2.1 e 2.2 são mostrados os valores referentes do Slump em função do tipo e especificação da obra.

Tabela 2.1 - Abatimento recomendado para diferentes tipos de obras.

Tipo de obra	Abatimento em cm	
	Máximo	Mínimo
Bloco sobre estaca e sapata	8	2
Viga e parede armada	10	2
Pilar de edifício	10	2
Laje maciça e nervurada	8	2

Fonte: NBR 6118/2007

Tabela 2.2 - Índices de consistência do concreto em função de diferentes tipos de obras e condições de adensamento.

Consistência	Abatimento (cm)	Tipo de obra	Tipo de adensamento
Extremamente seca (terra úmida)	0	Pré-fabricação	Condições especiais de adensamento
Muito seca	0	Grandes massa: pavimentação	Vibração muito enérgica
Seca	0 a 2	Estruturas de concreto armado ou protendido	Vibração enérgica
Rija	2 a 5	Estruturas correntes	Vibração normal
Plástica (Média)	5 a 12	Estruturas correntes	Adensamento manual
Úmida	12 a 20	Estruturas correntes sem grandes responsabilidades	Adensamento manual
Fluida	20 a 25	Concreto inadequado para qualquer uso	-

Fonte: NBR 6118/2007

2.1.2.1.2 Trabalhabilidade

A trabalhabilidade é a propriedade que apresenta a capacidade do concreto fresco de ser empregado com uma finalidade definida sem perda de sua homogeneidade (PETRUCCI, 1978). A maior ou menor facilidade com que o concreto é transportado, colocado, adensado e acabado e a maior ou menor facilidade com que se desagrega ou segrega durante estas operações é designada pelo termo genérico de “trabalhabilidade” (COUTINHO, 1997).

A American Society for Testing and Materials (ASTM) define, ainda, a trabalhabilidade como sendo a propriedade que determina o esforço necessário, para manusear certa quantidade de concreto fresco com menor perda homogeneidade, nos processos de lançamento, adensamento e acabamento (MEHTA; MONTEIRO, 1994).

Pode se argumentar de uma forma simples que a trabalhabilidade é a facilidade com a qual o concreto pode ser misturado, transportado, lançado, adensado com a menor perda de homogeneidade (ANDRIOLO, 1984).

De acordo com Giammusso (1992), a Trabalhabilidade é o atributo essencial para que o concreto seja adensado corretamente, por outras palavras é a compatibilização da consistência ao procedimento empregado no lançamento e adensamento.

As misturas de concreto têm a sua trabalhabilidade influenciada pelos seguintes itens:

a) Relação água/materiais secos;

b) Tipo e consumo de cimento;

c) Teor de argamassa;

d) Tamanho, textura e forma do agregado; e,

e) Aditivos e adições.

O concreto deve apresentar uma trabalhabilidade tal que assegure plasticidade máxima, segregação mínima e consistência apropriada (VERÇOZA, 1984).

A trabalhabilidade é muito influenciada por outras propriedades, por isso não existe ensaio para determinar esta propriedade do concreto fresco. A consistência é uma propriedade que garante a plasticidade ao concreto que, consequentemente, atribui características próprias à trabalhabilidade (SOUZA, 2007). A noção de trabalhabilidade é bastante ampla. Para caracterizá-la são utilizadas várias propriedades físicas para a sua determinação e consequentemente a sua medição não pode ser efetuada através de um só método (COUTINHO, 1997). Coutinho (1997) releva ainda que nenhum dos métodos utilizados fornece uma medida direta desta propriedade, a maioria fornece somente medidas indiretas.

2.1.2.2 Propriedades do concreto endurecido

O concreto no estado endurecido apresenta as seguintes propriedades: a massa específica, a resistência à compressão, a resistência tração, a permeabilidade e absorção, a retração, a fluência e a durabilidade.

2.1.2.2.1 Massa específica

De acordo com Roman et al (1999) apud Santos (2008), a massa especifica pode ser definida como a relação entre a massa do material e o seu volume e pode ser absoluta ou relativa. Na obtenção da massa especifica absoluta, não é considerado os vazios existentes no volume do material, enquanto que na relativa ou também denominada massa unitária, os vazios são considerados.

No concreto, denomina-se massa específica a massa da unidade de volume, incluindo os vazios. Com relação aos valores dessas massas, destaca-se que esses variam 2.000 kg/m^3 a 2.800 kg/m^3. Nessa perspectiva, para efeito de cálculo, considera-se quando a massa específica real não for conhecida, o valor de 2.400 kg/m^3 para o concreto simples e de 2.500 kg/m^3 para o concreto armado (NBR 6118/2007). Com a utilização de agregados leves, é possível reduzir para 1.800 kg/m^3 a ordem desse valor (PETRUCCI, 1978).

2.1.2.2.2 Resistência à compressão

A resistência à compressão é a tensão necessária para causar a ruptura do material, ou seja, é a tensão máxima que um dado concreto pode suportar sem entrar em colapso (MEHTA; MONTEIRO, 2008).

A resistência à compressão é a característica mecânica mais importante do concreto, pois nas estruturas a função deste material é essencialmente resistir às tensões de compressão, enquanto as armaduras têm a função de resistir às tensões de tração (COSTA; APPLETON, 2002).

Para Almeida (1990) apud Sponholz et al. (1998), a resistência à compressão dos concretos é influenciada por uma série de fatores, tais como:

a) Natureza e dosagem do aglomerante;

b) Granulometria;

c) Máxima dimensão, forma e textura superficial dos agregados;

d) Resistência e rigidez das partículas;

e) Relação água/cimento;

f) Porosidade;

g) Relação cimento/agregados;

h) Idade do concreto;

i) Grau de adensamento;

j) Condições de cura; e,

k) Condições de ensaio.

Vale salientar que a temperatura também influencia na resistência do concreto, devido a sua participação como catalisadora nas reações de hidratação do cimento.

Segundo Coutinho (1997), a resistência do concreto só não é afetada pela resistência do agregado graúdo quando seus valores são muito superiores aos valores da resistência do concreto, como é o exemplo das rochas com resistências com valores de resistências de 60 a 70 Mpa.

A resistência do concreto está relacionada com a resistência da pasta e consequentemente da resistência do cimento. O engenheiro deverá estar ciente que ao adotar determinada classe de cimento haverá uma influência direta sobre a resistência do concreto (SOUZA, 2007). Giammusso (1992) afirma que, o tipo do cimento afeta não só a resistência do concreto, mas também o comportamento dessa resistência ao longo do tempo. No entanto, Mehta e Monteiro (1994) afirmam que a influência da composição do cimento sobre a porosidade da matriz e a resistência do concreto, fica limitada às baixas idades”. A Tabela 2.3 mostra o efeito do tipo de cimento Portland sobre a resistência relativa do concreto a 1, 7, 28 e 90 dias.

Tabela 2.3 - Resistência relativa aproximada do concreto segundo a influência do tipo de cimento.

Tipo de cimento Portland	Natureza	Resistência à compressão (porcentagem em relação ao Tipo I ou concreto de cimento Portland comum)			
		1 dia	7 dias	28 dias	90 dias
I	Normal ou uso comum	100	100	100	100
II	Calor de hidratação moderado e moderada resistência a sulfatos	75	85	90	100
III	Alta resistência inicial	190	120	110	100
IV	Baixo calor de hidratação	55	65	75	100
V	Resistente a sulfatos	65	75	85	100

Fonte: MEHTA; MONTEIRO, 1994.

A Tabela 2.4 dará uma ideia da variação da resistência em função do tipo de cimento e da relação água/cimento.

Tabela 2.4 - Resistência média do concreto, em MPa em função da relação água/cimento para vários tipos de cimento brasileiro.

Tipo e classe do cimento	Relação a/c				
	0,65	0,60	0,55	0,50	0,45
CP I 32	28	32	37	41	47
CP II 32	24	28	31	35	39
CP II 40	28	32	36	41	46
CP III 32	23	27	31	36	41
CP III 40	27	32	37	42	49
CP IV 32	24	28	32	36	41
CP V ARI RS	30	33	38	42	46
CP V ARI	33	38	42	47	53

NOTAS:
1 – Agregados de origem granítica
2 – Diâmetro máximo 25 mm
3 – Abatimento entre 50mm e 70mm
4 – Concretos com aditivo plastificante normal

Fonte: Helene e Andrade (2007)

Helene e Andrade (2007) enfatizam a atenção para o menor valor da resistência à compressão que deve ser de 20 MPa para concretos apenas com armadura passiva (armado) e 25 MPa para concretos com armadura ativa (protendido). Contudo, admite-se a utilização de 15 MPa em alguns casos, tais como, concreto magro e em obras provisórias.

No Brasil e, principalmente em Natal-RN, tradicionalmente é usado 30 Mpa e em alguns casos até 40 MPa como valores de resistência a compressão para obras tradicionais, pois atendem perfeitamente as exigências estruturais com o maior custo benefício (SOUZA, 2007).

Geralmente, a resistência à compressão é determinada por meio de corpos de prova. Esses são submetidos a uma solicitação axial em um ensaio de curta duração, isto é, com uma taxa de carregamento elevada. A Tabela 2.5 mostra os valores relativos, aproximados, típicos de resistência a diversas idades.

Tabela 2.5 - Resistência relativa em relação à idade.

Idade (dias)	3	7	21	28
Resistência relativa (%)	50	70	92	100

Fonte: Giammusso (1992)

2.1.2.2.3 Permeabilidade e absorção

O concreto pode ser definido como um material poroso. Isso se deve pela impossibilidade de preencher totalmente os vazios do agregado com uma pasta de cimento. Segundo Petrucci (1978) isso ocorre em razão de se ter uma maior quantidade água, ultrapassando, assim, a quantidade necessária para a hidratação do cimento. No momento em que essa água evapora, os vazios aparecem. Outra razão se justifica pela combinação química, já que os volumes absolutos de cimento e água, que reagem, diminuem. Ainda, no decorrer da mistura do concreto, há a incorporação de ar na massa.

Dessa forma, o concreto torna-se permeável devido à interconexão dos vazios de água ou ar. A propriedade que possibilita o acesso de um fluído para o interior do concreto é definida como permeabilidade.

Souza (2007) afirma que todo o concreto é permeável dentro de uma dada escala, pois absorve certa quantidade de água.

A quantidade de água na mistura interfere diretamente nos índices da permeabilidade, pois Mehta e Monteiro (1994) afirmam que o teor desta determinará a quantidade de espaços vazios tanto após as reações de hidratação como pela

evaporação da mesma para a atmosfera. Assim sendo a permeabilidade diminui com a diminuição do fator água/cimento e também com a evolução dos processos de hidratação do concreto, isto é com a idade deste (Figura 2.1).

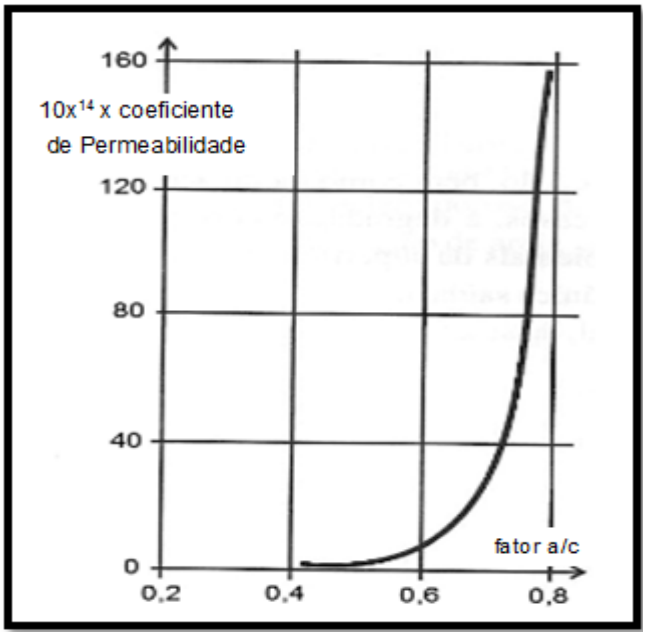


Figura 2.1 - Influência do fator água/cimento no coeficiente de permeabilidade do concreto.

Fonte: Souza e Ripper (1998).

Giammusso (1992) mostra na Tabela 2.6, os valores do fator água/cimento e a idade para a impermeabilização do concreto.

Tabela 2.6 - Relação entre o fator água/cimento e idade para a impermeabilidade do concreto.

Reação a/c	0,4	0,5	0,6	0,7
Idade em dias	3	7	28	360

Fonte: Giammusso (1992)

Denomina-se absorção, a penetração da água na estrutura porosa do concreto devido a forças capilares provenientes da diferença de pressão entre a superfície livre da água no exterior do concreto e a sua superfície nos poros capilares. A absorção depende do diâmetro capilar e ocorre se o concreto está sujeito a ciclos de molhagem e secagem (COUTINHO, 1998). Para Andriolo (1984) a

absorção é o processo físico pelo qual o concreto retém água nos poros e condutos capilares.

Neville (1997) ressalta que a absorção não deve ser usada como parâmetro de avaliação da qualidade do concreto, mas admite que a maioria dos concretos de qualidade boa possuem absorção menor que 10%.

A Tabela 2.7 mostra os principais fatores que influenciam a porosidade, a permeabilidade e a absorção (PETRUCCI, 1978).

Tabela 2.7 - Fatores que influenciam a porosidade, a permeabilidade e a absorção.

Materiais constituintes	**Água**	Quantidade Pureza
	Cimento	Composição Finura
	Agregados	Quantidade Tipo Diâmetro Graduação Impurezas
	Adições	Quimicamente ativos Quimicamente inerentes
Métodos de preparação	Mistura Lançamento Adensamento Acabamento	
Condições posteriores	Idade Cura Condições de ensaio	

Fonte: Petrucci, (1978)

2.1.3 Considerações acerca dos processos de produção do concreto

A garantia das qualidades essenciais de um concreto (resistência mecânica, durabilidade, baixa permeabilidade e constância de volume após endurecido) é assegurada por uma sequência de procedimentos, começando pela seleção

cuidadosa dos materiais (tipo e qualidade), proporção adequada entre os materiais constituintes (relação aglomerante-agregado e água-materiais cimentícios), aditivos e adições, e ainda, uma mistura, transporte, lançamento, adensamento, acabamento e por último, uma cura adequada (TUTIKIAN, 2004).

Pode-se conceituar cura como o conjunto de medidas que têm por objetivo evitar a evaporação precoce da água necessária à hidratação do cimento. A sua principal finalidade é impedir a perda de umidade e controlar a temperatura por um período suficiente para atingir o nível de resistência desejado (MEHTA; MONTEIRO, 2008). Nessa perspectiva, em determinação da Norma Brasileira, a cura deve ser feita durante os 7 primeiros dias a partir do lançamento do concreto. Porém, é recomendável realizá-la até 140 dias como garantia contra o aparecimento de fissuras devidas à retração.

2.1.4 Microestrutura e macroestrutura do concreto

Acerca da microestrutura do concreto, Mehta e Monteiro (2008) a definem como “a porção com grandeza microscópica da macroestrutura”. Ainda, esses autores acrescentam que os aparelhos empregados para essa análise possuem a capacidade de aumentar na ordem 10^5 vezes. Dessa forma, a microestrutura se constitui de tipo, tamanho, forma, quantidade e distribuição das fases presentes em um sólido.

No tocante ao termo macroestrutura, pode-se considerar que ele refere-se ao componente que é visível a olho nú, isto é, pode ser observado sem a necessidade de utilização de aparelhos de aumento. Nesse sentido, macroscopicamente o concreto é definido por ser um composto bifásico, constituído de agregados envoltos por um material ligante. Isto pode ser visualizado na Figura 2.2 que apresenta a seção de um corpo-de-prova de concreto de cimento Portland (AVELINO, 2011).

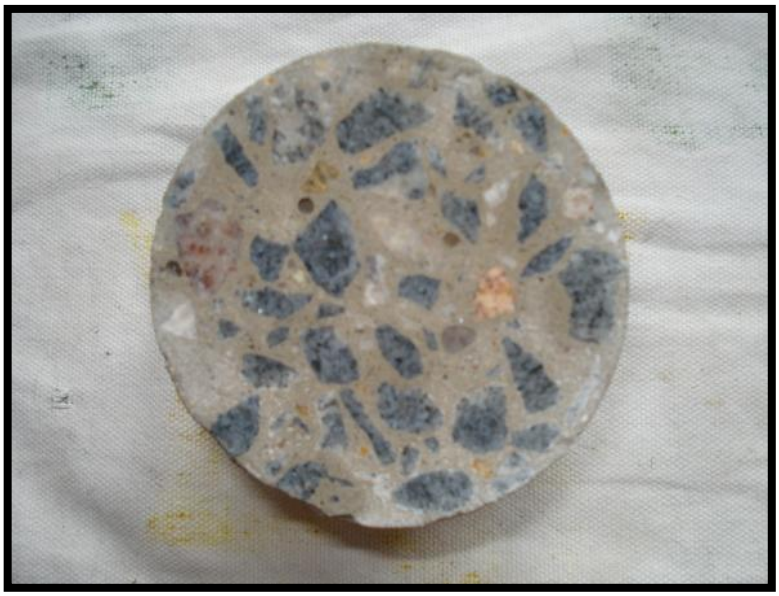


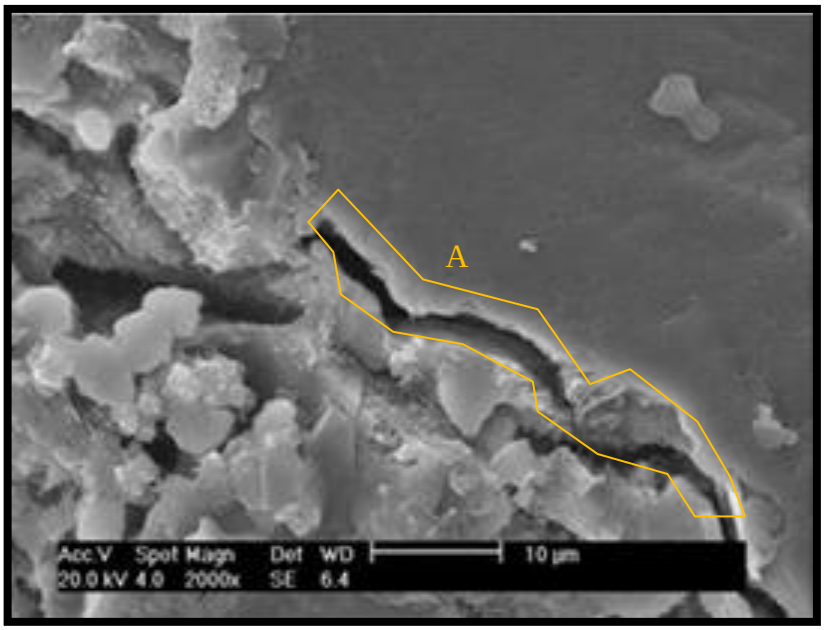
Figura 2.2 - Seção transversal de um corpo-de-prova de concreto.

Fonte: Avelino (2011)

Sá (2006) afirma que ao observar a estrutura do concreto microscopicamente, é possível distinguir a não homogeneidade entre as fases, que são divididas em: agregado, zona de transição interface e a matriz da pasta de cimento hidratado.

Assim sendo, a zona de transição interface é considerada como uma região microscópica que contorna o agregado, possuindo uma espessura com cerca de 10 a 50 μm. Esta região caracteriza-se por ser mais frágil em relação aos outros dois componentes do concreto: o agregado e a pasta de cimento hidratada (Figuras 2.3 e 2.4).

Conforme tais especificações, alguns teóricos, como Mehta e Monteiro (2008) e Neville (1997), afirmam que a zona de transição interface é uma região com influência bastante considerável no comportamento mecânico do concreto.



Legenda:

A – Zona de transição

Figura 2.3 - Microestrutura do concreto: zona de transição matriz-agregado.

Fonte: Avelino (adaptado 2011)

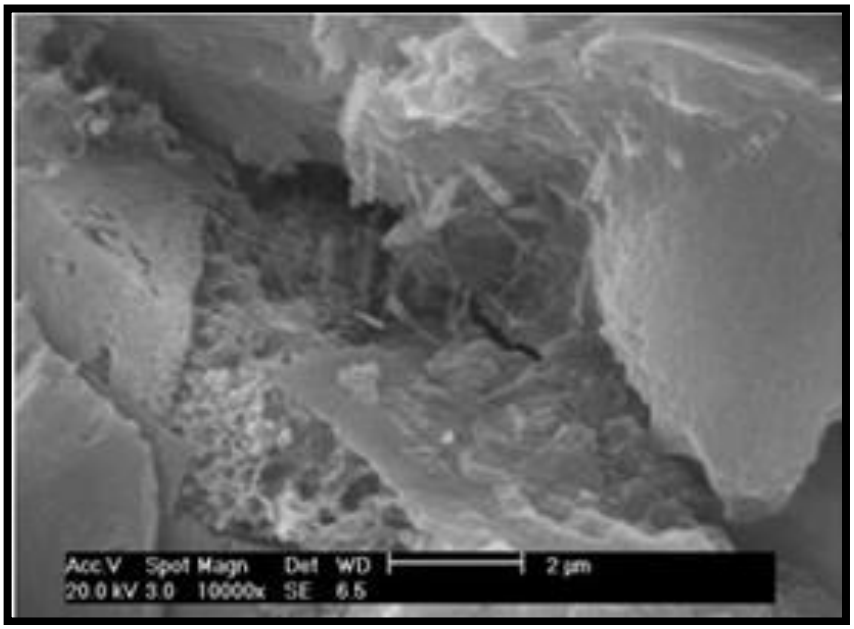


Figura 2.4 - Microestrutura do concreto: matriz da pasta do cimento.

Fonte: Avelino (2011)

2.2 Aglomerante

O aglomerante é definido sendo como um material ligante ou com propriedades aglutinantes, em geral pulverulentos. Tal material possui como principal finalidade unir os grãos dos agregados promovendo um aumento de resistência do material resultante. Nesse sentido, a mistura, em proporções adequadas de aglomerante, água e areia, é denominada argamassa, enquanto a mistura de aglomerante e água é denominada pasta.

Os aglomerantes classificam-se em ativos ou inertes. Os aglomerantes ativos, por sua vez, são subdivididos em:

a) Aéreos[1]: são aglomerantes que endurecem pela ação química do CO_2 do ar, como por exemplo, a cal aérea e o gesso;

b) Hidráulicos[2]: são aglomerantes que endurecem com a presença da água, porém, após seu completo endurecimento, tais aglomerantes resistem a ação desta substância. São exemplos deste tipo de aglomerante a cal hidráulica, o cimento natural e o cimento Portland; e,

c) Poliméricos: são aglomerantes que reagem através da polimerização de uma matriz.

No que concernem os aglomerantes inertes, podem ser caracterizados como os aglomerantes que endurecem por meio de secagem. São exemplos desse tipo de aglomerante as argilas e betumes (TARTUCE; GIOVANNETTI, 1990).

2.2.1 Cimento

De uma forma geral, o cimento é definido como um material ligante, isto é, um material com propriedades adesivas e coesivas com capacidade de unir frações de minerais entre si de modo a formar um todo compacto.

[1] (TARTUCE; GIOVANNETTI, 1990).
[2] (VERÇOZA, 1984).

Contudo, no campo da construção civil, tal termo faz referência aos materiais ligantes usados com pedras, areia, tijolos, blocos entre outros (NEVILLE, 1997).

O cimento vem sendo empregado desde os tempos mais remotos. Historicamente, constatou-se que os egípcios já empregavam um gesso impuro calcinado nas suas construções. Ainda foi apurado que na Grécia e Roma Antiga, já se utilizava um aglomerante que endurecia em presença da água. Tal material era denominado de cimento pozolânico e era produzido a partir da mistura de cal e cinzas vulcânicas, provenientes das proximidades da cidade de Pozzuoli, na Itália. (MASSAZZA, 2004). Posteriormente, esse produto foi sendo aperfeiçoado sobre uma nova fórmula que integra o uso de cal, água, areia e pedra fragmentada, tornando-se o primeiro concreto da história (NEVILLE, 1997).

Nessa perspectiva, outros produtos foram acrescidos nessa mistura com a finalidade de se obter resistência. Dessa forma surgiu o cimento Portland, que segundo a Associação Brasileira de Cimento Portland[3] (2009) foi um grande passo no desenvolvimento do cimento, já que em 1756 o inglês John Smeaton conseguiu obter um produto de alta resistência por meio de calcinação de calcários moles e argilosos. Em 1818, o francês Vicat obteve resultados semelhantes aos de Smeaton, pela mistura de componentes argilosos e calcários. Ele é considerado o inventor do cimento artificial. Em 1824, o construtor inglês Joseph Aspdin queimou conjuntamente pedras calcárias e argila, transformando-as num pó fino. Percebeu que obtinha uma mistura que, após secar, tornava-se tão dura quanto às pedras empregadas nas construções. A mistura não se dissolvia em água e foi patenteada pelo construtor no mesmo ano, com o nome de cimento Portland, que recebeu esse nome por apresentar cor e propriedades de durabilidade e solidez semelhantes às rochas da ilha britânica de Portland.

Atualmente, o cimento Porland é considerado um aglomerante hidráulico oriundo da moagem e mistura do clinquer com certa quantidade de gesso (2 a 3%). O clinquer é um material granular da mistura em proporções adequadas de calcário e argila em um forno rotativo a temperatura em torno de 1400° C. Mehta e Monteiro (1994) consideram que este material é constituído principalmente de silicato de cálcio hidratado com uma certa quantidade de sulfato de cálcio.

[3] Sigla: ABCP

A ABCP (2002) define o cimento Portland como um pó muito fino com propriedades aglomerantes, aglutinantes ou ligantes, que endurece sob a ação da água.

2.2.1.1 Composição química do cimento

As análises químicas rotineiras apresentam os elementos presentes no cimento em termos de óxidos tornando complexa a obtenção de uma conclusão acerca das propriedades do cimento (BORJA, 2011). Dessa forma, os constituintes fundamentais do cimento Portland são: a cal (CaO), a sílica (SiO_2), a alumina (Al_2O_3), o óxido de ferro (Fe_2O_3), certa quantidade de magnésia (MgO) e uma pequena porcentagem de anidrido sulfúrico (SO_3), que é adicionado após a calcinação para retardar o tempo de pega do produto (PERUZZI, 2002). Os compostos individuais dos óxidos que compõem o cimento estão expostos nas Tabelas 2.8 e 2.9.

Tabela 2.8 - Compostos e abreviações dos óxidos.

Óxido	Abreviação
CaO	C
SiO_2	S
Al_2O_3	A
Fe_2O_3	F
MgO	M
SO_3	S
H_2O	H

Fonte: Borja (2011).

Tabela 2.9 - Proporção de óxidos nos cimentos Portland[4]

Oxído	Teor %
CaO	60 - 70%
SiO_2	20 - 25%
Al_2O_3	2 - 9%
Fe_2O_3	1 - 6%
MgO	0 - 2%

Fonte: http://www.abcp.org.br (2013).

São considerados compostos principais os quatro constituintes do cimento Portland explicitados na Tabela 2.10:

Tabela 2.10 - Compostos principais constituintes do cimento Portland.

Nome	Composição	Abreviação	Típico do Brasil
Silicato tricálcico:	3 CaO. SiO_2	C_3S	40 – 70%
Silicato bicálcico:	2 CaO. SiO_2	C_2S	10 – 40%
Aluminato tricálcico:	3 CaO. Al_2O_3	C_3A	2 – 15%
Ferro Aluminato tetracálcico:	4 CaO. Al_2O_3. Fe_2O_3	C_4AF	3 – 15%

Fonte: Norton, (1973)

Além dos componentes acima mencionados, Souza e Ripper (1998) relacionam outros componentes presentes na constituição do cimento, porém em proporções menores. Esses componentes são: os álcalis[4] (Na_2O, K_2O), o óxido de magnésio (MgO), a cal livre (CaO), dentre outros. Deve-se ressaltar que a ação de alguns destes compostos em quantidades maiores, pode tornar-se prejudicial. Um exemplo disso é o Óxido de Magnésio (MgO), cuja forma cristalina é denominada de perisclásio. Esse material possui uma hidratação lenta e expansiva podendo reagir com o agregado, resultando em reações álcali-agregado.

A Figura 2.5 a seguir mostra a distribuição dos componentes numa partícula de clínquer e a Tabela 2.11 revela as proporções médias dos principais componentes de cimento e as suas propriedades durante e após a hidratação.

[4] Os álcalis se apresentam na forma de sulfatos.

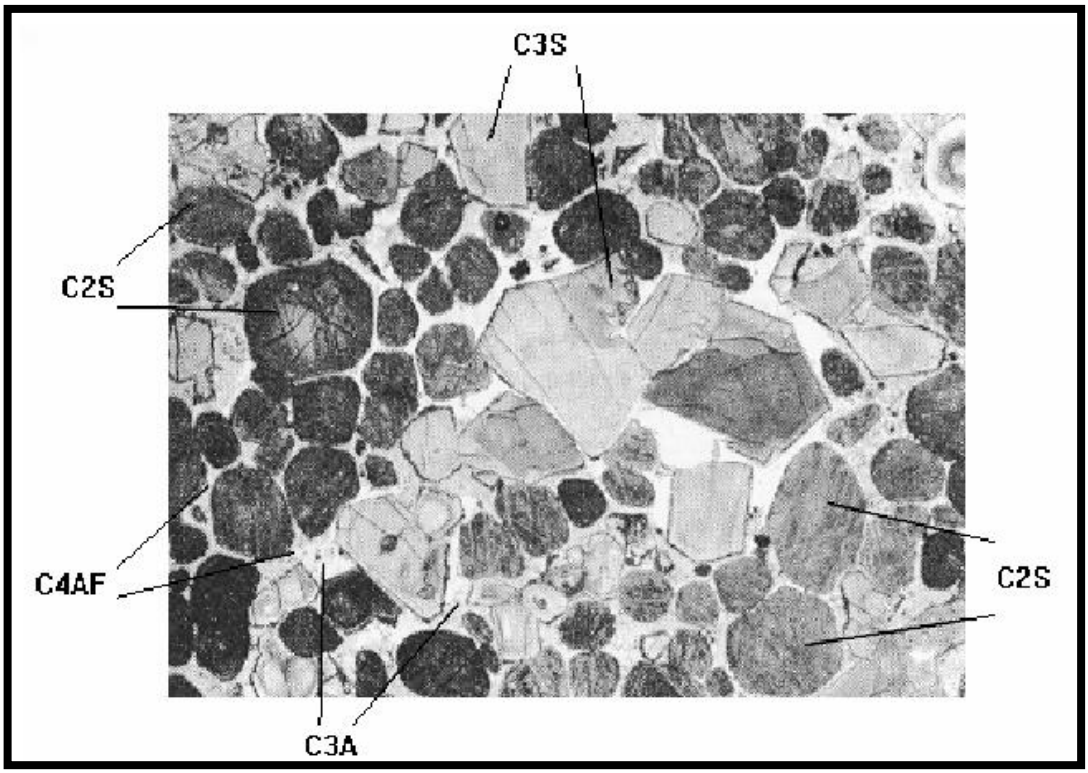


Figura 2.5 - Distribuição dos componentes numa partícula de clínquer.

Fonte: Breugel (1991).

Tabela 2.11 - Características dos componentes do Clínquer Portland

Componentes do clínquer		C_3S	C_2S	C_3A	C_4AF
Proporções médias		60%	20%	8%	12%
Velocidade de hidratação		Elevada	Moderada	Muito elevada	Elevada
Calor de Hidratação	Quantidade	Elevada (120 cal/g)	Pequena (60 cal/g)	Muito elevada (200 cal/g)	Moderada (100 cal/g)
	Desenvolvimento	Rápido	Lento	Rápido	Lento
Desenvolvimento da resistência mecânica		Rápido e prolongado	Lento e muito prolongado	Muito rápido e de curta duração	Lento e pouco significativo
Resistência ao ataque químico		Pequena	Moderada	Muito pequena	Grande

Fonte: Especificação LNEC E 477 - Betões. Guia para a utilização de ligantes hidráulicos.

2.2.1.2 Hidratação do cimento Portland

A hidratação na química do cimento reporta-se a totalidade das trocas ou alterações químicas que ocorrem quando o cimento é misturado com a água (TAYLOR 1997).

Entende-se que quando o cimento é misturado com água há ocorrência de reações de hidratação, formando assim, compostos estáveis que cristalizam com aspecto fibroso. Esses compostos se unem e proporcionam ao conjunto uma elevada resistência (COSTA; APPLETON, 2002).

Em relação à hidratação do cimento Portland, Carvalho (2002) afirma que pode ser analisada como a soma das reações dos vários compostos individuais do cimento que ocorrem simultaneamente.

Dessa forma, a hidratação desse cimento ocorre mediante a hidratação dos seus quatro componentes principais: C_3S, C_2S, C_3A e C_4AF. Os aluminatos (C_3A e C_4AF) são responsáveis pelo endurecimento, enquanto a resistência do material resultante é definida pelos silicatos (C_2S e C_3S). Este fenômeno é geralmente apresentado de forma simplificada pela equação abaixo, onde C-S-H representam os silicatos de cálcio hidratados e CH, o hidróxido de cálcio (NÓBREGA, 2006).

$$\text{Cimento} + H_2O \rightarrow \text{C-S-H} + \text{CH} + \text{calor} \qquad (2.2)$$

A evolução das reações de hidratação está diretamente relacionada à evolução das propriedades do material como módulo de elasticidade, resistência, fluência, retração, dentre outros. Esta evolução pode ser denominada pelo termo “envelhecimento” do concreto (FARIA, 2004).

A Figura 2.6 mostra a imagem da pasta de cimento Portland obtida por microscopia eletrônica de varredura com três dias de idade, mostrando os cristais de $Ca(OH)_2$ e a estrutura fibrosa formada pelo C-S-H (silicatos hidratados). Na Figura 2.7 pode-se visualizar com mais detalhes a estrutura fibrosa do C-S-H (silicatos hidratados).

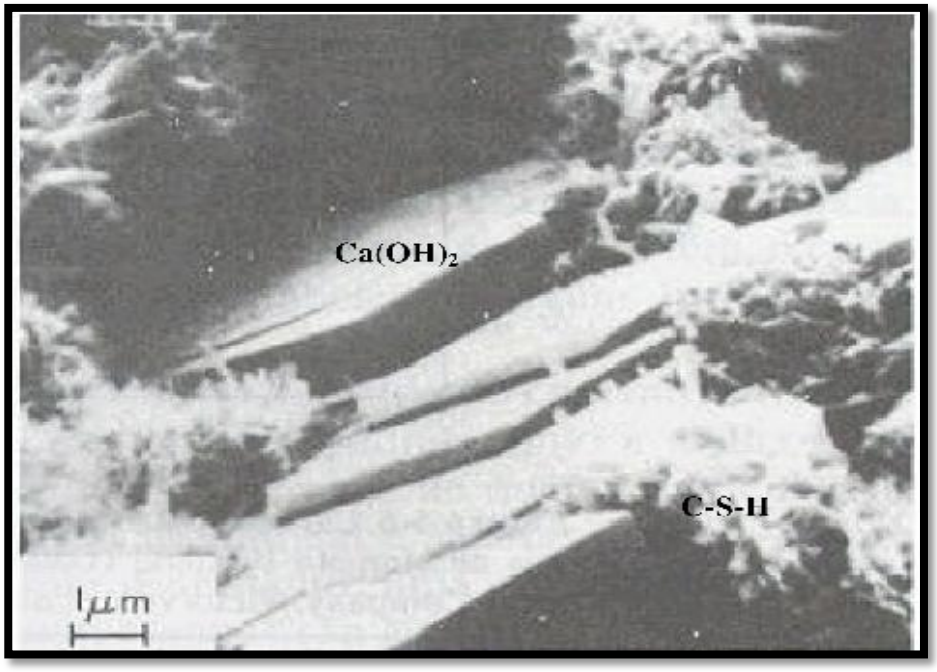


Figura 2.6 - Micrografia eletrônica de varredura de uma pasta de cimento Portland com 3 dias de idade mostrando os cristais de $Ca(OH)_2$ e a estrutura fibrosa formada pelo C-S-H.

Fonte: Mehta e Monteiro (2008)

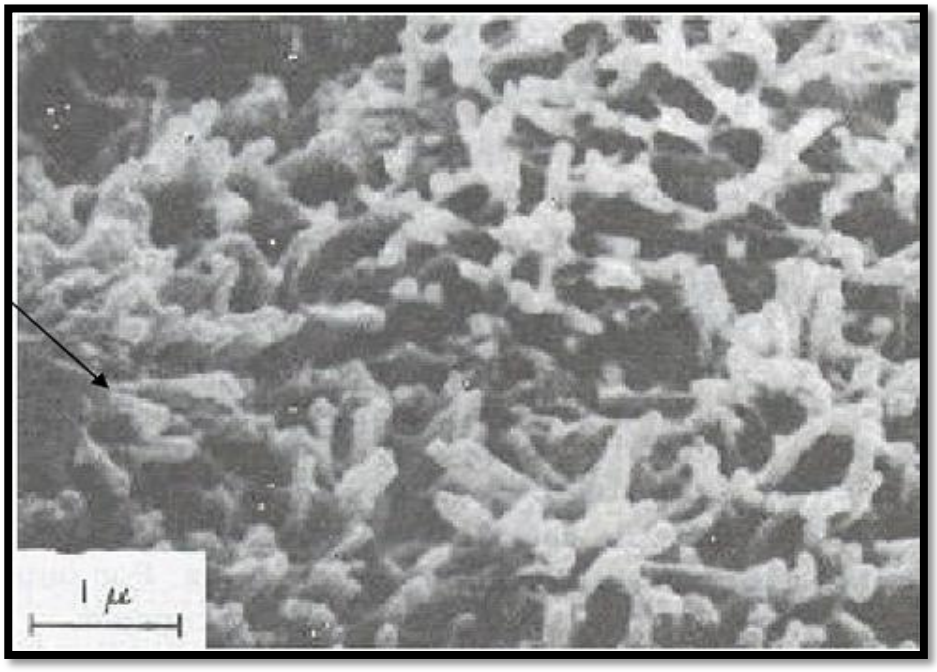
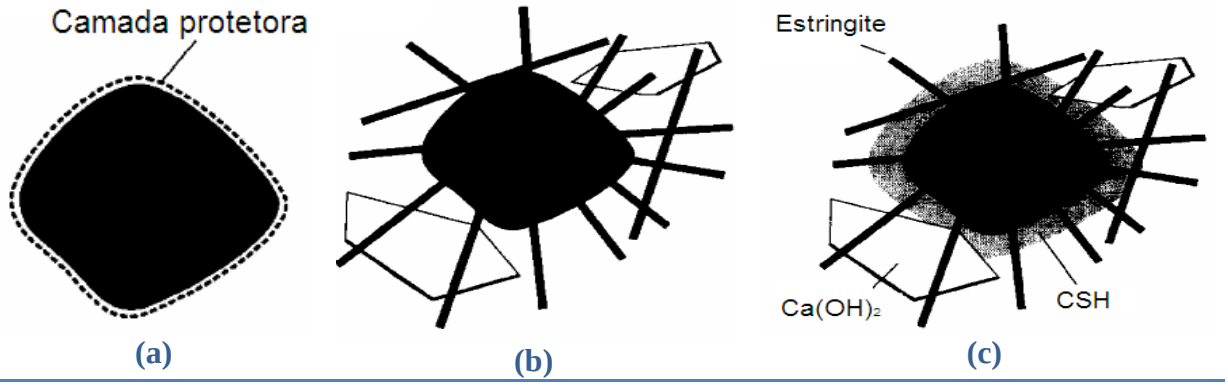


Figura 2.7 - Morfologia fibrosa do C-S-H com três dias de idade.

Fonte: Mehta e Monteiro (2008)

Além disso, a hidratação do cimento Portland compreende distintas fases, possuindo particularidades diferentes a vários níveis, com relação aos reagentes envolvidos e velocidades de reação. Mediante Beek (2000), Breugel (1991), Lura (2000) e Maekawa et al.(1999), apud Azenha (2004) o processo de hidratação pode ser desmembrado em três fases: período inicial, período intermédio e período tardio (Figura 2.8 e Figura 2.9).



Período inicial – camada protetora desacelera a hidratação	**Período intermédio** – formação de produtos de hidratação instáveis	**Período tardio** – formação de produtos de hidratação estáveis

Figura 2.8 - As três fases do processo de hidratação.

Fonte: Maekawa (1999) apud Azenha (2004).

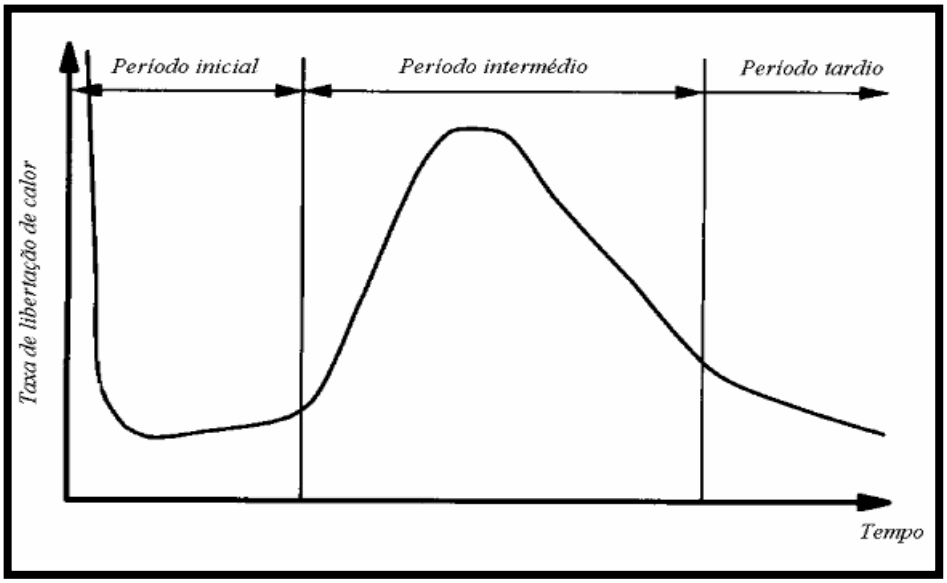


Figura 2.9 - Libertação de calor durante a hidratação do cimento

Fonte: Maekawa (1999) apud Azenha (2004).

Em referência às fases do processo de hidratação pode-se explicitar que o Período inicial (Figura 2.8 a) reporta-se ao momento do contato entre a água e as partículas de cimento, quando há o início imediato das reações entre os íons superficiais das partículas do clínquer e da água. Dessa forma, o gesso reage com a água e o C_3A formando a estringite e os silicatos de cálcio, ao reagirem com água, formam os silicatos de cálcio hidratados semi-estáveis. Estas reações são caracterizadas por serem altamente exotérmicas (ver Figura 2.9 período inicial) e duram apenas alguns minutos (cinco ou menos). Posteriormente a essa fase inicial, também denominada pré-indução, surge uma fase de inatividade aparente, denominada de indução ou dormente, podendo durar até 5h. Essa dormência fundamenta-se pela formação de uma camada protetora em torno das partículas do cimento, que impede o progresso de novas reações (AZENHA, 2004).

No entanto, o Período intermédio ocorre após a eliminação da camada protetora (Figura 2.8 b). Nessa fase as partículas de cimento hidratam-se à elevada velocidade com formação de silicatos de cálcio hidratados (CSH) e hidróxidos de cálcio (CH), transformando a estringite em monosulfoaluminato hidratado. Diante disso, as partículas de cimento sofrem uma expansão originando fibras alongadas na rede porosa devido à sobreposição destas partículas de cimento. É nessa fase, ainda, que ocorre um pico de geração de calor (ver Figura 2.9 período intermediário) devido à extensão e o caráter exotérmico das reações, seguida de uma freada nas reações provocada pela camada de produtos de hidratação formadas em torno das partículas de cimento. Isso dificulta o acesso da água para a hidratação dos reagentes não hidratados. A duração deste período está entre 24 e 48h (AZENHA, 2004).

Por fim, o Período tardio que é considerado a continuação do período intermédio, porém com velocidades de reação muito menores devido ao espessamento progressivo da camada de produtos de hidratação (Figura 2.8 c), o que reduz a taxa de libertação de calor (ver figura 2.9 período tardio) relativamente ao que sucede na fase intermédia. Os produtos de reação decorrentes da fase final do período intermédio são bastante estáveis (AZENHA, 2004).

Embora a reação de hidratação ocorra com todos os componentes pode-se explicitar que a velocidade de hidratação de cada um deles é diferente. A reatividade do C_3A é maior seguida de C_3S_2, C_4AF e C_2S (SILVA, 2006).

Peruzzi (2002) relata que no processo de hidratação do cimento Portland os principais produtos (fases sólidas principais) comumente presentes na pasta são: Silicato de Cálcio Hidratado (C-S-H), a Portlandita $Ca(OH)_2$ (ou CH), e os Sulfoaluminatos. Suas quantidades, formas e características principais estão apresentadas na Tabela 2.12 a seguir.

Tabela 2.12 - Principais produtos presentes na pasta do cimento Portland.

Produto	Quantidade	Forma	Características
Silicato de Cálcio Hidratado (C-S-H)	50% a 60% do volume de sólidos	Partículas de 1nm a 100nm	**a)** arranjo irregular de lamelas entrelaçadas; **b)** criam espaços de diferentes formas e tamanhos (5Â a 25Â); **c)** água capilar – vazios até 50 Ã; **d)** água livre – nenhum efeito na evaporação; **e)** água adsorvida – ligada por pontes de hidrogênio (15Â). Liberada em 30% U.R., responsável pela retração de secagem.
Portlandita $Ca(OH)_2$ ou CH	20% a 25% do volume de sólidos	Cristais grandes; Prismas hexagonais 1µm	**a)** sua contribuição para a resistência se dá por força de Van Der Walls.
Sulfoaluminatos	15% a 20% do volume de sólidos		**a)** desempenham papel menos importante na resistência mecânica; **b)** vulneráveis ao ataque por sulfatos.

Fonte: Peruzzi (2002)

Observa-se ainda a presença de grãos anidros do clínquer, que estão em um intervalo de $1 f\hat{E}m$ a $50 f\hat{E}m$[5].

O comportamento mecânico do cimento depende principalmente da sua composição química e da finura derivada da moagem. Os componentes essenciais que influenciam na resistência da pasta de cimento são o silicato tricálcico e o silicato bicálcico. O primeiro, por apresentar sua rápida reação com a água, contribui

[5] Fonte: MEHTA e MONTEIRO (1994)

para as resistências iniciais, enquanto que o segundo devido a sua reação bastante lenta com a substância em questão, contribui para as resistências em longo prazo.

A finura do cimento é determinada através da superfície específica. Normalmente os cimentos apresentam uma superfície específica Blaine da ordem de 3000 a 3500cm^2/g, porém em caso de cimento com finura muito alta pode apresentar superfícies específicas muito superiores. Assim quanto maior a finura do cimento, maior será a quantidade de componentes hidratados visto que só os grãos do cimento participam das reações, resultando em maior resistência da pasta.

2.2.1.3 Tipos de cimento

Por ser um dos maiores produtores do cimento Portland, o Brasil conta com uma grande variedade de tipos de cimento. Esta variedade é resultante das propriedades físicas e químicas específicas que o concreto deve atender. Dessa forma, uma escolha adequada de qual cimento empregar numa determinada obra exige um bom conhecimento das características dos diversos cimentos disponíveis no mercado.

As designações das classes de cimento 25, 32 e 40 são as resistências, respectivamente, 25 MPa, 32 MPa e 40 MPa determinadas aos 28 dias, segundo ABNT [6] (GIAMMUSSO, 1992).

O resumo dos diversos tipos de cimento brasileiros e as normas que os especificam estão elencados na Tabela 2.13 (SOUZA; RIPPER, 1998).

[6] Associação Brasileira de Normas Técnicas

Tabela 2.13 - Nomenclatura dos cimentos Portland.

Nome técnico		Sigla	Classe	Identificação do tipo e classe
CIMENTO PORTLAND COMUM (NBR 5732)	Cimento Portland comum	CP I	25	CP I-25
			32	CP I-32
			40	CP I-40
	Cimento Portland comum com adição	CP I-S	25	CP I-S-25
			32	CP I-S-32
			40	CP I-S-40
CIMENTO PORTLAND COMPOSTO (NBR 11578)	Cimento Portland composto com escória	CP II-E	25	CP II-E-25
			32	CP II-E-32
			40	CP II-E-40
	Cimento Portland composto com pozolana	CP II-Z	25	CP II-Z-25
			32	CP II-Z-32
			40	CP II-Z-40
	Cimento Portland composto com calcário	CP II-F	25	CP II-F-25
			32	CP II-F-32
			40	CP II-F-40
CIMENTO PORTLAND DE ALTO-FORNO (NBR 5735)		CP III	25	CP III-25
			32	CP III-32
			40	CP III-40
CIMENTO PORTLAND POZOLÂNICO (NBR 5736)		CP IV	25	CP IV-25
			32	CP IV-32
CIMENTO PORTLAND DE ALTA RESISTÊNCIA INICIAL (NBR 5733)		CP V-ARI	-	CP V-ARI
CIMENTO PORTLAND RESISTENTE AOS SULFATOS (NBR 5737)		-	25	Sigla e classe dos tipos originais acrescidas do sufixo BC.
			32	
			40	
CIMENTO PORTLAND BRANCO (NBR 12989)	Cimento Portland branco estrutural	CPB	25	CPB-25
			32	CPB-32
			40	CPB-40
	Cimento Portland branco não estrutural	CPB	-	CPB
CIMENTO PARA POÇOS PETROLÍFEROS (NBR 9831)		CPP	G	CPP – classe G

Fonte: ABCP (2002)

Na Tabela 2.14, Souza e Ripper (1998) mostram os diferentes teores de materiais para os diferentes tipos de cimento.

Tabela 2.14 - Teores dos componentes de cimento Portland

Sigla	Componentes (% em massa)			
	Clínquer + sulfato de cálcio	**Escória de alto-forno**	**Material pozolânico**	**Material carbônico**
CP I	100	-	-	-
CP I-S	99-95	1-5	1-5	1-5
CP II-E	94-56	6-34	-	0-10
CP II-Z	94-76	-	6-14	0-10
CP II-F	94-90	-	-	0-10
CP III	65-25	35-70	-	0-5
CP IV	85-45	-	15-50	0-5
CP V-ARI	100-95	-	-	0-5

Fonte: Souza e Ripper (1998)

2.3 Agregados

Os agregados são materiais granulares, geralmente inertes, sem forma e volume definidos, de origem natural ou artificial com dimensões adequadas para as obras de engenharia. Este material possui um papel marcante no que diz respeito ao concreto, visto que ele ocupa quase 80% do peso estrutural.

Tais materiais apresentam normalmente uma resistência à compressão muito superior à da argamassa de concreto, por isso proporcionam dinamismo considerável quando se reporta aos concretos de alta resistência à abrasão e alto desempenho. Contudo, a sua influência decorrente das suas propriedades é pequena em concretos convencionais.

A respeito dos agregados, Bauer (2000) salienta que “a forma dos grãos do agregado graúdo tem uma grande influência na qualidade do concreto, pois este altera trabalhabilidade”. O mesmo autor adiciona que, as impurezas, presentes principalmente no agregado miúdo, são prejudiciais à qualidade do concreto.

Desse modo, a distribuição granulométrica do agregado deve ser regulada de modo a permitir uma maior densidade no empacotamento das partículas, diminuindo o consumo de cimento, para uma determinada trabalhabilidade (MEHTA; MONTEIRO, 1994).

De acordo com Silva (2006), as principais características que devem ser observadas no agregado são as seguintes: massa específica, textura, granulometria e resistência à abrasão. Silva (2006) ainda expõe que, uma vez que agregado é o responsável pela estabilidade dimensional, massa unitária e módulo de elasticidade do concreto, torna-se necessário um controle rigoroso da qualidade deste material, visto que o objetivo é manter o fator água/cimento o mais baixo possível.

A função dos agregados[7] está proposta em prover o aglomerante de um material de enchimento relativamente econômico, como também prover a pasta de partículas adaptadas para resistir às cargas aplicadas, ao desgaste mecânico e à percolação da intempérie e por último, reduzir as variações de volume resultantes do processo de pega, endurecimento e variações de umidade na pasta de cimento, cal e água.

Os agregados são classificados de uma forma geral quanto à origem, quanto à dimensão das partículas e quanto à composição mineralógica[8].

Dessa forma, quanto à sua origem, os agregados são classificados em:

a) Naturais: já encontrados na natureza na forma já pronta para ser utilizada; e,

b) Artificiais: são os que precisam de transformação artificial para chegar à condição adequada para sua utilização, como é o caso da areia de origem da britagem das rochas como basalto, calcário, dentre outras.

A NBR 7211/2009 classifica os agregados de acordo com a dimensão das partículas, em agregado graúdo e em miúdo. Sendo o Agregado graúdo caracterizado como um material proveniente da britagem de rochas estáveis, com um máximo de 15% passando na peneira de 4,8mm, podendo ser exemplificado por pedregulho natural, seixo rolado, pedra britada, dentre outros. E, o Agregado miúdo sendo definido como o material passante na peneira de 4,8mm, ficando no máximo 15% deste retido na mesma peneira. Exemplos de agregados miúdos são areia natural quartzosa ou pedrisco resultante do britamento de rochas estáveis (PETRUCCI, 1980).

[7] De acordo com Santos (2008)
[8] De acordo com Santos (2008)

Mehta e Monteiro (2008) consideram que as propriedades dos agregados estão intensamente relacionadas com a composição mineralógica da rocha fonte, as condições de exposição da rocha e ao tipo de equipamento utilizado para extração do agregado. A Tabela 2.15 demonstra como os agregados podem ser divididos de acordo com os condicionantes.

Farias e Palmeira (2007) argumentam que o maior ou menor consumo de cimento Portland está sujeito a superfície específica e a porosidade dos grãos de agregados.

Tabela 2.15 - Propriedades dos agregados de acordo com as condicionantes.

	Condicionantes		
	Porosidade	**Composição química e mineralógica**	**Condições prévias e condicionantes de fabricação**
CARACTERÍSTICAS	- Massa específica aparente; - Absorção de água; - Resistência; - Módulo de Elasticidade; - Sanidade.	- Resistência; - Módulo de Elasticidade; - Substâncias deletérias presentes; - Cargas elétricas.	- Tamanho; - Forma; - Textura das partículas.

FONTE: Farias e Palmeira (2007)

Portanto, vale ressaltar que é relevante se ter um conhecimento da massa específica[9] e da massa unitária[10] do agregado no ato da dosagem com o intuito de obter um concreto de boa qualidade e que vá atender às especificações da obra.

[9] Por definição, massa específica ou real é a massa do material, incluindo os poros internos, por unidade de volume. Normalmente, essa massa varia entre 2600kg/m^3 e 2700kg/m^3 para muitas rochas utilizadas na construção.

[10] A massa unitária ou aparente é a massa das partículas do agregado que ocupam uma unidade de volume, e tem o seu valor compreendido geralmente entre 1300 kg/m^3 a 1750 kg/m^3.

2.4 Adições minerais

As adições minerais são materiais com propriedades pozolânicas ou cimentíceas, adicionados ao concreto, antes ou durante da mistura, em quantidades que variam geralmente entre 5 e 100% do peso do cimento (SILVEIRA, 1996). Existe uma diferença bastante sutil entre aditivos e adições e são definidos no inglês como “chemical admixture” e “mineral admixture”, respectivamente. Os aditivos são acrescentados ao concreto em pequenas quantidades, no máximo 5% em relação à massa do cimento, enquanto que as adições podem até substituir grande parte do cimento. (CIMENTO ITAMBÉ 2012). Ambos com o objetivo de melhorar o desempenho do concreto.

Mehta e Monteiro (2008), afirmam que as adições minerais são materiais silicosos finamente divididos, com propriedades cimentícias, pozolânicas ou de preenchimento de poros (fíller), incorporados ao concreto em quantidades relativamente grandes, que variam de 20 a 70% por massa do cimento.

Geralmente são utilizadas de duas formas: substituição de parte do cimento, com o objetivo de diminuir os custos e; como adição em percentuais variáveis em relação à massa de cimento, com o intuito de dar destino final ao resíduo, sendo que este, juntamente com aditivos superplastificantes, consiste atualmente na forma mais utilizada.

Segundo Dal Molin (2005) as adições minerais classificam-se de acordo com ação físico-química, em três grupos: material cimentante, material pozolânico e fíller.

Abordando as características desses grupos, pode-se entender, primeiramente, que os materiais cimentantes são aqueles que não precisam do hidróxido de cálcio (presente no cimento Portland) para produzir produtos cimentantes como o C-S-H. Contudo, a hidratação deste material é lenta e a quantidade de produtos cimentantes produzidos é insuficiente para a utilização deste material para fins estruturais.

Por conseguinte, acerca do material pozolânico, a NBR 12653/2012 e a ASTM C 618 (1978) especificam que o termo pozolana ou material pozolânico se aplica àqueles com pouca ou nenhuma propriedade cimentante, mas que, quando finamente divididos e em presença de água, são capazes de reagir com hidróxido de

cálcio liberado durante o processo de hidratação dos minerais – silicatos – que compõem o cimento liberando com ele e fixando-o à temperatura ambiente (SANTOS, 1997).

Ainda, a denominação “pozolana” é oriunda da palavra “Pozzuoli” de Província de Pozzuoli (antiga Puteoli do Império Romano), Itália. Registros históricos indicam que há 2.000 anos, os romanos já empregavam em suas construções uma cinza de origem vulcânica como material cimentício.

O emprego de pozolanas no concreto iniciou-se na década de 60, quando foi adicionada cinza volante em obras de barragens com a finalidade de reduzir o calor de hidratação, como também os custos. Quanto à inclusão de adições minerais no concreto, pode-se relatar que essa prática intensificou-se nos anos 70 com o uso de microssílica, buscando assim concretos de alta resistência sem comprometimento de sua trabalhabilidade. Tais adições, quando introduzidas no concreto no estado fresco, reagem quimicamente com o hidróxido de cálcio (CH), produzindo uma quantidade adicional de silicato de cálcio hidratado (C-S-H), responsável pela resistência do concreto.

Mediante Silveira (1996), as pozolanas são normalmente utilizadas de duas formas: como substituição parcial do cimento ou como adição em teores variáveis em relação à massa ou volume do cimento. Porém, Mehta (1987) especifica que independentemente de como a pozolana é utilizada, a reação pozolânica e os benefícios associados são os mesmos.

O emprego das pozolanas em substituição ao cimento Portland aumenta a resistência mecânica do concreto, uma vez que propiciam uma mudança na estrutura dos poros mediante o refinamento proporcionado pelas reações pozolânicas e também devido ao tamponamento e obstrução dos poros pelo o efeito fíller (CORDEIRO 2008).

A possibilidade de substituição parcial de cimento Portland por pozolanas se dá devido à sílica amorfa, que está presente na sua constituição química, ser a responsável principal pela fase ativa das pozolanas. Esta entra em contato com água e à temperatura ambiente, solubiliza em meio alcalino e reage com íons Ca^{+2} para formar silicatos de cálcio hidratados (Equação 2.3). O C-S-H formado nestas reações pozolânicas é similar ao C-S-H produzido nas reações de hidratação do

cimento Portland. O hidróxido de cálcio formado na hidratação do cimento Portland é a principal fonte de cálcio para as reações pozolânicas (CORDEIRO 2006).

$$xSiO2 + yCaO + zH2O \rightarrow xCaO.ySiO2.zH2O \quad (2.3)$$

Guedert (1989) apud Santos (2008), afirma que o emprego de pozolanas em adição ao cimento afere ao concreto e a argamassa características como:

a) Menor calor de hidratação, pela troca de reações exotérmicas (hidratação do cimento), por reações atérmicas (pozolânicas);

b) Melhor resistência ao ataque ácido em função da estabilização do hidróxido de cálcio oriundo da hidratação do clínquer Portland e à formação um C-S-H com menor relação CaO/SiO_2 de menor basicidade; e,

c) Maior durabilidade, contribuindo para a inibição da reação álcali-agregado e diminuição do diâmetro dos poros da pasta hidratada, reduzindo o ataque do material por substâncias externas como cloretos e sulfatos.

As conveniências da utilização de pozolanas em concretos com cimento Portland são o aumento da trabalhabilidade do material, o aumento da resistência à fissuração devido à redução da reação álcali-agregado, e maior impermeabilidade. Portanto pode-se compreender que ao se tornar menos permeável, sua durabilidade tende a aumentar (MEHTA, 1987).

Ao concluírem seus estudos experimentais, Isaia (1995) e Dal Molin (2005) aduziram que essas adições também promoviam aumento significativo na durabilidade das estruturas de concreto por modificarem a microestrutura da pasta de cimento hidratada, alterando a estrutura de poros e tamanhos dos grãos, promovendo redução na porosidade capilar do concreto, responsável pelas trocas de umidade, íons e gases com o meio, além de diminuir o calor de hidratação e, consequentemente, as fissuras de origem térmica.

As pozolanas classificam-se como materiais naturais[11] e materiais artificiais[12]. No ramo da construção civil, se emprega atualmente vários materiais pozolânicos, entre esses alguns se destacaram mais como cinza volante, sílica ativa, metacaulim e cinza da casca de arroz, em substituição parcial ao cimento Portland em pastas, argamassas e concretos.

Pode-se aferir que o uso destes materiais possibilita não só a redução de problemas ambientais relacionados ao uso de cimento Portland em concreto que requer grande quantidade de matéria-prima natural (argila e calcário) e libera bastante CO_2 na atmosfera durante a sua produção, como também uma melhoria nas propriedades mecânicas do material, mediante a sua adição.

Foi evidenciado a partir de diversos estudos[13] que a CBC possui a propriedade pozolânica e o seu uso como material de adição ao concreto pode promover uma pesquisa tecnológica inovadora e com contribuição ambiental.

Por fim, fíller é definido por Borja (2011) como um material fino, sem atividade química, utilizado nos compósitos com o objetivo de aprimorar o empacotamento granulométrico e ação como pontos de nucleação para a hidratação dos grãos do cimento. O refinamento dos poros resulta num aumento de compacidade, o que melhora significativamente as propriedades resistência e permeabilidade do material resultante.

Mehta e Monteiro (2008) explicam que, devido à natureza extremamente fina desses materiais, elas atuam como efeito fíller, diminuindo o volume de vazios, consequentemente diminuindo a porosidade, reduzindo a permeabilidade e melhorando a resistência mecânica e a durabilidade, e consequentemente promovendo efeitos permanentes no material.

Nessa perspectiva, Dal Molin (2005) e Isaia (1995) ressalvam que as adições minerais normalmente utilizadas são resíduos provenientes de subprodutos industriais e agroindustriais, como a CBC que na maioria das vezes são descartados em grandes quantidades e em locais impróprios.

---

[11] os que precisam de tratamento algum e que levem a modificações químicas e mineralógicas, exemplo rochas vulcânicas, terras diatomáceas, argilas calcinadas.

[12] oriundas de transformações químicas, como exemplo podemos citar a cinza volante, sílica ativa, escória granulada de alto-forno, cinza de casca de arroz.

[13] Isso pode ser comprovado mediante as pesquisas realizadas por Anjos (2009), Cordeiro (2006) e Ganesan et al. (2007).

Vale a pena ressaltar que o termo “subprodutos industriais” refere-se a aqueles materiais que são secundários nas indústrias produtoras e que podem ou não sofrer algum tipo de processamento. Segundo Cincotto (1988) apud Silva (2004) os termos resíduos e subproduto possuem significados totalmente diferentes. O termo resíduo é circunstancial, refere-se a um material acumulado, sem destinação; após uma aplicação qualificada, passa a ser um subproduto. Dessa forma, diversos resíduos agroindustriais apresentam propriedades pozolânicas.

A ativação térmica para produção de pozolanas a partir deste resíduo, a cinza do bagaço da cana-de-açúcar, segundo Anjos (2009), se dá por meio da temperatura de queima nos fornos, do tempo de queima, do tempo e tipo de moagem empregada e do grau de amorficidade da cinza.

Martirena Hernández et al., (1998) explicam que o surgimento das diferentes fases da sílica (amorfas ou cristalinas) é devido à temperatura de queima do bagaço de cana-de-açúcar, na qual a presença de material cristalino nas cinzas é devida às altas temperaturas de combustão nas caldeiras. Paula (2006) argumenta ainda, que além da temperatura, o período de queima também influencia a forma e a quantidade da sílica.

Freitas (2005) e Cordeiro et al. (2009) argumentam que a presença de fases cristalinas reduz a atividade pozolânica e que para o seu melhor emprego é necessário melhorar suas propriedades pozolânicas. Freitas (2005) acrescenta ainda que pode se transformar a sílica cristalina em sílica amorfa, através do processo de calcinação.

De acordo com Mehta & Monteiro (1995) apud Anjos e Martinelli (2008) as CBC obtidas sem qualquer controle na temperatura, normalmente apresentam grandes quantidades de minerais de sílica não reativos. Para desenvolver atividade pozolânica o mesmo autor afirma que é necessário reduzir o tamanho das partículas até obter um material muito fino.

Quando a temperatura de queima do bagaço de cana-de-açúcar é superior a 800° C resulta na formação de fases cristalinas da sílica ocasionando uma diminuição da reatividade (Martirena Hernández et al. (1998). Os autores sugerem ainda, que para uma maior reatividade é necessário que a CBC contenha substâncias na forma amorfa.

Cordeiro et al (2009) nas suas pesquisas com a queima de CBC em várias temperaturas constataram que a temperatura mais eficiente para atividade pozolânica foi a de 600° C. Na Figura 2.10 pode ser visualizado a influência da temperatura de queima na reatividade da CBC.

Quanto maior a temperatura no interior da caldeira e maior o tempo de exposição ao calor, maior será a quantidade de carbono liberada, produzindo diferentes colorações de cinzas (CORDEIRO, 2006). A coloração é o principal indicativo do grau de calcinação a que o bagaço foi submetido e, consequentemente, ao seu teor de carbono (Figura 2.11).

Nunes (2009), afirma que mesmo que a CBC não possua índice de atividade pozolânica relevante, isso não elimina a hipótese da existência de reações entre a cinza do bagaço da cana e o cimento Portland, no que se refere ao consumo de hidróxido de cálcio.

É necessário expor ainda que a eficiência de uma adição mineral é dependente de vários fatores, como: quantidade utilizada, condições de cura e, principalmente, da sua composição química, mineralógica e granulométrica. As duas últimas características são as principais responsáveis pela ação diferenciada das adições no comportamento do concreto[14].

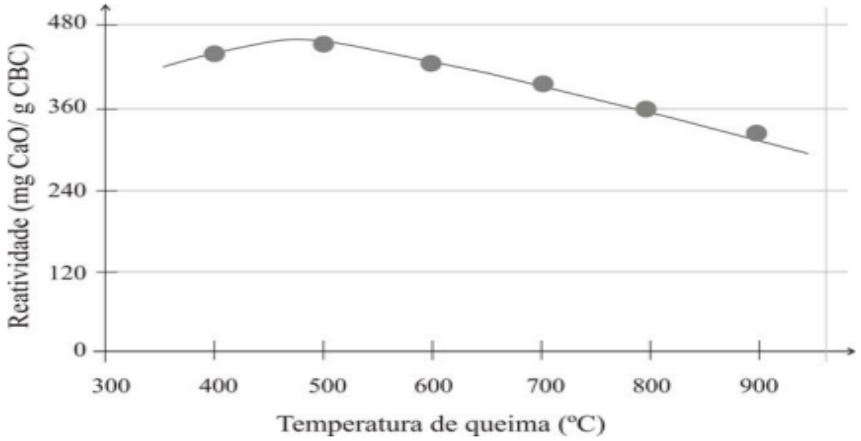


Figura 2.10 Efeito da temperatura de queima na reatividade da CBC utilizando o método de chapelle modificado.

Fonte: Cordeiro et al (adaptado 2008)

[14] Especificação feita por Dal Molin (2005) e Cordeiro et. al. (2010).

Figura 2.11 Colorações de CBC
(a) Bagaço de cana-de-açúcar; (b) diferentes cinzas residuais geradas após a queima do bagaço em caldeira: cinza escura com alto teor de carbono, característico de combustão incompleta; (c) cinza com menor teor de carbono e (d) cinza gerada após combustão completa

Fonte: Cordeiro (2006).

2.5 Cana-de-açúcar

Com intuito de caracterizar a cinza do bagaço da cana-de-açúcar estabelecendo um estudo de sua relação e importância na construção civil, inicialmente deve-se tecer considerações acerca da cana-de-açúcar.

Trata-se de uma planta pertencente ao gênero *Saccharum L*. e que há pelo menos seis espécies do gênero, sendo a cana-de-açúcar cultivada um híbrido multiespecífico, recebendo a designação Saccharum spp. As espécies de cana-de-açúcar são provenientes do Sudeste Asiático. A planta é a principal matéria-prima para a fabricação do açúcar e álcool (etanol). É uma planta da família *Poaceae*, representada pelo milho, sorgo, arroz e muitas outras gramas. As principais características dessa família são a forma da inflorescência (espiga), o crescimento do caule em colmos, e as folhas com lâminas de sílica em suas bordas e bainha aberta (CANA-DE-AÇÚCAR, 2012).

Oriunda do sudeste da Ásia, a cana-de-açúcar é plantada numa vasta área territorial, delimitada entre os paralelos 35º de latitudes Norte e Sul. Tal produto sempre mostrou melhor rendimento em climas tropicais.

No Brasil, foi implantada por Martim Afonso de Sousa no ano de 1532, e desde então, passou a ter uma importância considerável para o País. Inicialmente, seu cultivo restringia-se a Zona da Mata nordestina. Posteriormente, com a ampliação da produção, destinou-se a região Sudeste, especialmente no Estado de São Paulo (Figura 2.12).

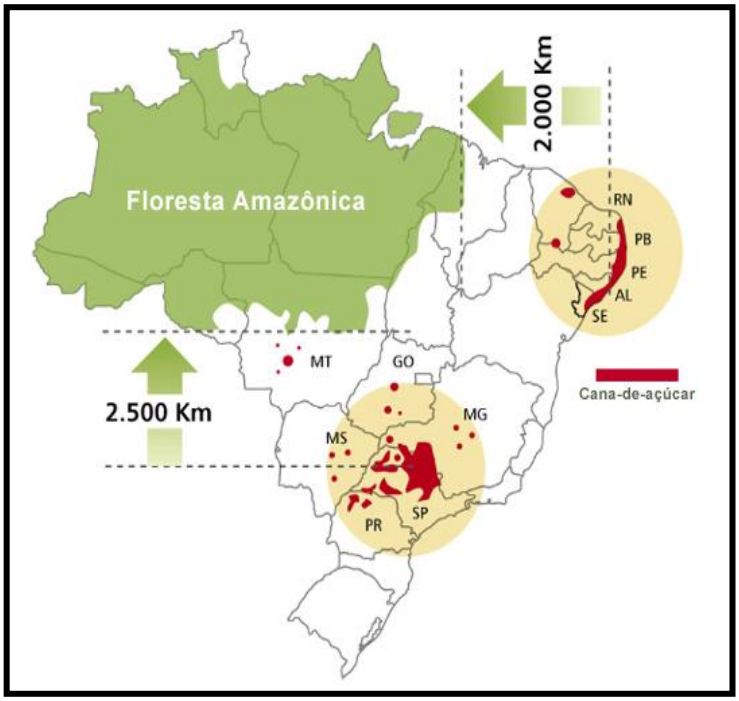


Figura 2.12 - Mapa de produção do Setor Sucroenergético de 2008.

Fonte: IBGE

Recentemente, segundo a CONAB[15], com 623,905 milhões de toneladas registradas na safra de 2010/11, o Brasil é consolidado o maior produtor mundial por obter esse recorde (PIRES, 2012). De acordo com um levantamento desse mesmo órgão, apresentado desde a safra de 1970/71, a produção de cana-de-açúcar no país vem crescendo ano após ano, exceto algumas exceções (Tabela 2.16). Constata-se que a segunda maior colheita brasileira ocorreu na safra de 2009/10, com 604,514 milhões de toneladas, a terceira foi a de 2008/09, com 571,400 milhões, seguida da safra de 2007/08, com 501,536 milhões de toneladas.

[15] Companhia Nacional de Abastecimento

A cana-de-açúcar é produzida em quase todo o país, com destaque para o Estado de São Paulo, que detém 53,9% da produção nacional (PIRES, 2012).

Tabela 2.16 - Produção da cana-de-açúcar no Brasil

Ano-Safra	Milhões de toneladas
1970/71	79,753
1971/72	79,595
1972/73	95,074
1973/74	91,994
1974/75	95,624
1975/76	91,525
1976/77	103,173
1977/78	120,082
1978/79	129,145
1979/80	138,899
1980/81	148,651
1981/82	153,858
1982/83	166,753
1983/84	197,995
1984/85	202,765
1985/86	224,364
1986/87	227,873
1987/88	224,496
1988/89	221,339
1989/90	223,410
1990/91	222,163
1991/92	228,791
1992/93	223,991
1993/94	216,963
1994/95	240,869
1995/96	249,877
1996/97	289,529
1997/98	302,193
1998/99	315,641
1999/00	310,123
2000/01	254,922
2001/02	292,338
2002/03	316,122
2003/04	357,111
2004/05	381,447
2005/06	394,411
2006/07	429,479
2007/08	501,536
2008/09	571,400
2009/10	604,514
2010/11	623,905

Fonte: CONAB (2012) apud Pires (2012)

2.5.1 A Utilidade do bagaço da cana-de-açúcar

Durante a produção de açúcar e álcool é gerado como subproduto o bagaço de cana resultante da extração do caldo da cana-de-açúcar pelo processo de moagem. A quantidade desse bagaço extraído chega a aproximadamente 30% da cana moída e tem sido aproveitada como fonte energética, pois cerca de 95% desta biomassa é queimada em caldeiras para geração de vapor na produção de açúcar e álcool (PAULA, ET AL. 2009).

Dos principais subprodutos das usinas de açúcar e álcool podemos citar: o vinhoto (o caldo restante após a destilação é fracionado na fabricação de Etanol), a torta de filtro (consiste em um material sólido que fica retido nos filtros, após a fermentação do açúcar durante a filtragem do líquido que ainda contém sacarose) e o bagaço. Esse último é um resíduo sólido composto de lignina e celulose “in natura”, constituído por 45% de fibras lignocelulósicas, 50% de umidade, 2 a 3% de sólidos insolúveis e 2 a 3% de sólidos solúveis em água. Quimicamente é formada de celulose, hemicelulose e lignina, com 41%, 25% e 20%, respectivamente, com base na massa seca de bagaço (ZARDO, 2004).

Nos últimos tempos, tem sido objeto de atenção de indústrias do setor pesquisas para a otimização dos processos com o intuito de viabilizar a utilização desses subprodutos e o desenvolvimento de outras tecnologias que aumentem o seu valor.

Cordeiro (2006) afirma que para cada tonelada de cana-de-açúcar, são produzidas cerca de 260 kg de bagaço (Figura 2.13) com 50% de umidade. Dentre os resíduos da unidade industrial sucroalcooleira, o bagaço é um dos mais atrativos por causa de seu poder calorífico, o que faz dele a principal fonte energética do processo produtivo da fabricação do açúcar e do álcool (CORDEIRO et al, 2008; SOUZA ET AL. 2007).

Embora seja considerado também um dos maiores rejeitos da agroindústria nacional, sua aplicação industrial transcende desde a fabricação de composto para ração animal, fertilizante e biogás à matéria-prima para compensados e para indústria química em geral.

No início do século XXI, o seu uso direcionou-se para produção de energia (térmica e mecânica), conhecido como co-geração (SOUZA; AZEVEDO, 2006).

Por definição, a co-geração é a geração simultânea de energia térmica e mecânica a partir de um mesmo combustível (gás natural, resíduos de madeira, casca de arroz, bagaço da cana, palha, ponteiros etc.) (COELHO, 1999).

Figura 2.13 - Montanha de bagaço de cana-de-açúcar.

Fonte: NIPE (2011)

2.5.2 A cinza do bagaço da cana-de-açúcar

Durante combustão nas caldeiras das usinas, alimentadas pelo bagaço para co-geração de energia elétrica, gera-se um novo resíduo, a cinza do bagaço da cana-de-açúcar.

De acordo com FIESP/CIESP[16] (2001), para cada 250 kg de bagaço queimado há uma produção de cerca de 6 kg de cinza residual (0,7 % da massa de cana-de-açúcar).

[16] Federação das Indústrias do Estado de São Paulo (FIESP) e Centro das Indústrias do Estado de São Paulo (CIESP).

Para Cordeiro (2006), a cinza possui como composto químico principal a sílica (SO_2), em quantidades acima de 60% em massa normalmente. O referido autor ainda salienta que com condições de queima controladas é possível manter a sílica contida no bagaço em estado amorfo, característica principal que possibilita o uso desse resíduo como pozolana e, consequentemente, diminuir as despesas e o impacto ambiental relativos à sua disposição no meio ambiente. Além disso, a adição da cinza pode agregar valor econômico ao resíduo e proporcionar vantagens técnicas e ambientais tanto a sua adição como a substituição parcial de cimento Portland (CORDEIRO, 2006).

É importante ressaltar que o alto teor de silício presentes no CBC é absorvido do solo pelas raízes da cana-de-açúcar na forma de ácido monossilícico (H_4SiO_4) e, posteriormente a transpiração (saída de água da planta), fica retido na parede externa das células da epiderme sob a forma de sílica gel (BORJA, 2011).

O acúmulo de sílica entre a cutícula e a parede das células da epiderme trabalha como um obstáculo físico à penetração de fungos patogênicos e diminui a perda de água por transpiração (BARBOZA FILHO, 2002).

Segundo Borja (2011), outra possível fonte de sílica é a areia oriunda da lavoura da plantação da cana-de-açúcar que não é totalmente removida durante a etapa de lavagem do processamento.

Normalmente, essas cinzas são usadas como fertilizantes (adubação) nas próprias lavouras de cana, em paralelo com as tortas de filtro e a palha (CORDEIRO 2006). No entanto, devido à carência dos nutrientes minerais para seu uso como adubo, muitas vezes essas cinzas são descartadas na natureza sem uma destinação adequada, muito embora seja um material de difícil degradação (FIESP/CIESP, 2001).

Na Tabela 2.17 são apresentados os resultados da composição química da CBC em termos de óxidos, obtidos nos estudos de diferentes autores de acordo com Borja (2011).

Mediante a variação dos resultados apresentados na tabela corrobora-se a afirmação de que as características da cinza são dependentes das condições de queima do bagaço e da umidade que este apresenta. Porém, para todos os autores constatou-se um alto teor de silicatos (acima de 60%).

Tabela 2.17 - Composição de cinzas do bagaço da cana-de-açúcar, em termos determinados por Borja et al. (2010), Cordeiro (2006), Massazza (2004), Goyal et al. (2007) e Martirena Hernández et al. (1998).

Composição	BORJA	CORDEIRO	MASSAZA	GOYAL	MARTIRENA HERNÁNDEZ
SiO_2	72,69	78,34	75,0	62,43	72,74
Al_2O_3	6,91	8,55	6,7	4,38	5,26
Fe_2O_3	9,61	3,61	6,3	6,98	3,92
TiO_2	0,72	0,50	-	-	0,32
CaO	2,84	2,15	2,8	11,8	7,99
MgO	-	1,65	3,2	2,51	2,78
SO_3	0,92	-	-	1,48	0,13
K_2O	4,71	3,46	2,4	3,53	3,47
Na_2O	0,00	0,12	1,1	-	0,84
P_2O6	-	1,07	4,0	-	1,59
Perda ao Fogo	18,9	0,42	0,9	4,73	0,77

Fonte: Borja (2011)

Na Figura 2.14 é possível observar a micrografia da cinza com um aumento de 12000X.

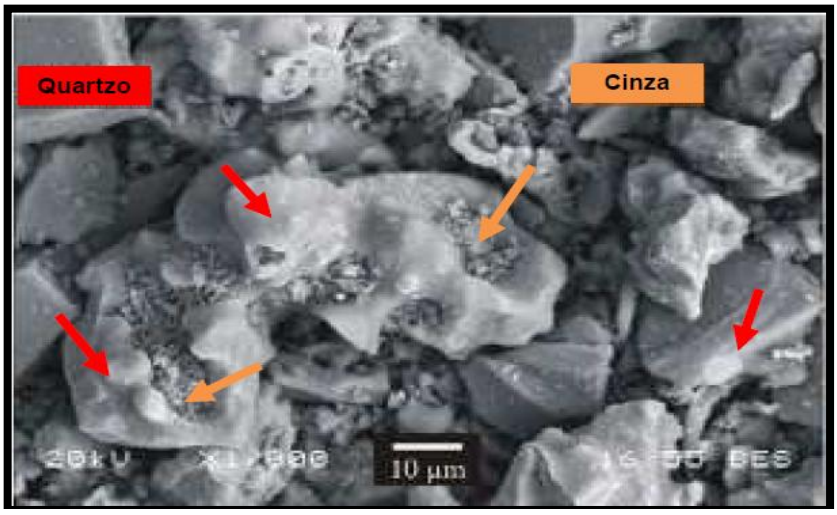


Figura 2.14 - Morfologia das partículas da cinza de biomassa de cana-de-açúcar com partículas de quartzo.

Fonte: Cordeiro (adaptado 2006)

Com o aumento da indústria de cana-de-açúcar no Brasil, constatou-se também, um incremento na ocorrência de problemas referentes à destinação dos resíduos produzidos pelo setor.

Diante disso, vários pesquisadores têm se debruçado no desenvolvimento de alternativas para uma destinação sustentável do referido material e também uma maneira de agregar valor ao subproduto da indústria de cana-de-açúcar. Na Figura 2.15 é apresentado todo o processo da geração da cinza a partir da cana de açúcar.

A indústria da Construção Civil se apresenta como um dos mais fortes candidatos para a destinação desses resíduos, mediante a incorporação destes em matrizes cimentícias. Além de ser o setor que mais consome matérias primas natural é também responsável pelo consumo de 4,5% da energia total do mundo. No entanto, a maior parte dessa energia, cerca de 84%, é usada na fabricação de materiais (ENBRI[17]).

Prevê-se que parte desses resíduos pode ser destinada à produção de novos materiais de construção e atender à crescente demanda por tecnologias alternativas mais simples, eficientes e preocupadas com a sustentabilidade dos processos produtivos, de acordo com o ilustrado na Tabela 2.18.

Para que a cinza seja utilizada como adição mineral ela deve ser derivada da indústria ou vegetal, com elevado teor de silicatos, produzida no estado amorfo e com finura adequada (JOHN ET AL., 2003).

Já na utilização de cinzas como adição pozolânica torna-se imprescindível o emprego de alguns procedimentos específicos de moagem e queima. É importante ressaltar que tais procedimentos podem acarretar a inviabilidade econômica devido à baixa reatividade predominante na maioria dos casos.

Os autores Cordeiro (2006) e Macedo (2009), ressaltam o fato da presença de matéria orgânica nas cinzas sob a forma de carbono livre resultante da combustão ineficiente que aumentam a absorção de água. Nas caldeiras, à falta de controle da temperatura de combustão e o tipo de resfriamento são fatores que dão pouca possibilidade para a obtenção de uma boa homogeneização do resíduo, resultando em cinzas sem reatividade hidráulica. No entanto tal fator não inviabiliza, pois podem ser empregados como material não reativo (SALES; LIMA, 2010).

[17] European Network of Building Research Institutes (ENBRI).

(a) corte de cana

(b) transporte

(c) extração do caldo

(d) saída do bagaço com umidade

(e) estoque do bagaço com umidade

(f) secagem

(g) alimentação das caldeiras com bagaço seco

(h) caldeiras de queima do bagaço para a produção do álcool

(i) cinzas resultantes (CBC)

Figura 2.15 - Processo de geração de cinzas.

Fonte: Souza et al. (2007)

Tabela 2.18 - Resíduos gerados pela cana-de-açúcar.

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

Fonte: FIESP (2001) e Freitas (2005)

De acordo com Cordeiro (2006), a CBC, se for moída adequadamente, possibilita a manutenção das propriedades mecânicas dos concretos com menor consumo de cimento Portland e com reduzido desprendimento de calor.

Zardo (2004), explica que ainda existem poucos estudos sobre o mecanismo de interação química entre o cimento e o açúcar. Estima-se que e o aumento do tempo de hidratação seja resultado da adsorção de açúcar na superfície das partículas de cimento que estão hidratando e/ou formação de uma barreira temporária que dificulta a hidratação das partículas de cimento (JUENGER &

JENNINGS, 2002). O autor explica ainda que a adsorção talvez seja resultado de um fenômeno chamado quelação[18].

A referida cinza pode ser utilizada como material de substituição ao cimento, de carga ou inerte, em substituição aos agregados. Outros materiais como esses resíduos têm conquistado cada vez mais espaço devido ao custo bem inferior, uma vez que o valor de custo da areia natural tem sido constantemente elevado.

De acordo com John et al (2003) as pesquisas envolvendo esse assunto estão concentradas na cinza da casca de arroz, que apresenta teores de SiO_2 normalmente acima dos a 90%. Contudo, investigações comprovam que a CBC pode ter o mesmo potencial de utilização desde que para comprovação sejam realizados estudos aprofundados.

2.5.3 Aplicabilidade da cinza do bagaço da cana-de-açúcar como aditivo

Com a finalidade de realizar uma explanação acerca dos estudos desempenhados sobre a utilidade da cinza do bagaço da cana-de-açúcar se torna interessante recorrer a alguns autores para constatar o que tem sido mencionado a respeito dessa temática.

Inicialmente, Mesa Valenciano (1999) estudou o emprego de cinza do bagaço na confecção de pastas com cimento Portland para a produção de tijolos de solo-cimento. A cinza coletada por Valenciano junto à Usina Furlan, localizada em Santa Bárbara D'Oeste/SP, foi submetida à moagem em moinho de bolas por 3 horas. Em sua descrição a autora não faz referência às condições de moagem utilizadas, mas a granulometria do produto mostrou que somente 6,3% das partículas eram menores que 75 μm. Foram ensaiadas, em seu estudo, pastas de consistência normal segundo NBR 7215/1997 com substituição de até 50% de cimento por cinza do bagaço. Os resultados indicaram que a incorporação da cinza aumentou o conteúdo de água e reduziu significativamente a resistência à compressão aos 28 dias das

[18] Processo em que as moléculas orgânicas formam um complexo com os íons metálicos em fases do cimento.

pastas. Com relação à mistura de referência, a redução da resistência das pastas com 10%, 30% e 50% de substituição foi de 1,9%, 11,5% e 64,0%, respectivamente.

Nessa perspectiva de estudos se enquadram Singh et al (2000). Esses autores examinaram a hidratação das misturas de cimento Portland com adição de CBC e concluíram que este atua como um material pozolânico. Com a presença de CBC no aglomerante, o grau de hidratação do cimento se mostrou inferior do que o cimento referência. No ensaio de resistência à compressão, o aglomerante com 10% de adição de CBC registrou valores superiores ao cimento referência em todas as idades de hidratação. Houve redução da permeabilidade nos aglomerantes devido à reação pozolânica da CBC.

Ainda, na tentativa de avaliar a oportuna utilização do CBC como material alternativo de construção, Mesa Valenciano e Freire (2004) avaliaram algumas características físicas e mecânicas de misturas de solo, cimento e cinzas de bagaço de cana-de-açúcar. Dessa forma, verificaram que a substituição parcial do cimento Portland por 20% de cinzas na mistura de solo-cimento-cinzas não afetou a massa específica aparente seca máxima dos solos estudados, tratados ou não com cimento. A incorporação de 3% de cimento ou sua substituição parcial por 20% de cinzas de bagaço de cana-de-açúcar em misturas de solo-cimento-cinzas aumentou a resistência à compressão simples de ambos os solos, referida aos 60 dias de idade. A temperatura de 600 ºC revelou os melhores resultados de reatividade do material. A CBC, proveniente da usina COAGRO, calcinada a 600 ºC por 5 horas, escolhida para estudos de resistência à compressão, apresentou atividade pozolânica inferior ao valor mínimo estabelecido pela NBR 5752/2012. A CBC apresentou uma quantidade menor de quartzo, e a calcinação adicional realizada no laboratório, possibilitou a eliminação do carbono. Os diversos ensaios realizados permitiram determinar o potencial da cinza da usina COAGRO após o processo de calcinação, como pozolana para argamassa. O emprego desta cinza provocou uma queda na resistência à compressão para todas as idades ensaiadas, medida nas argamassas com substituição do cimento Portland por CBC (5%, 10%, 15% e 20%) em relação à de referência (sem CBC) (FREITAS, 2005).

Cordeiro (2006) estudou diferentes configurações de moagem da cinza ultrafina do bagaço de cana-de-açúcar e o material apresentou propriedades mecânicas dos concretos razoáveis com menor consumo de cimento Portland e com

reduzido desprendimento de calor. Já Anjos e Martinelli (2008) concluíram na sua pesquisa que o índice de atividade pozolânica da CBC estudada é superior aos 75% para todas as adições de cinza analisadas, podendo ser utilizadas em pastas cimentícias sem prejudicar as resistências à compressão aos 28 dias. Esses autores averiguaram ainda que a cinza ultrafina do bagaço aperfeiçoou as propriedades do concreto no estado fresco, com aumento dos valores de abatimento do tronco de cone e redução da tensão cisalhante de escoamento, em comparação com o concreto de referência. A mesma adição proporcionou ainda redução na absorção de água por capilaridade e na penetração acelerada de íons cloreto no concreto, até o teor avaliado de 20% de substituição de cimento.

Martins et al (2007) debruçaram sobre a cinza fina e leve do bagaço de cana-de-açúcar liberada juntamente com os gases provenientes do processo de queima e coletada no sistema lavador de gás de uma termoelétrica. Mediante esse estudo os autores puderam avaliar a natureza da sílica de bagaço de cana-de-açúcar plantada em solo tipo arenito de Bauru e finalmente consideraram que, com um aumento no tempo de queima, há uma melhoria no processo de separação resultando em um resíduo de elevada quantidade de sílica e baixa fração de carbono.

Ganesan et al (2007) estudaram os efeitos da substituição parcial do cimento por CBC nas propriedades mecânicas e físicas do concreto endurecido. Os resultados mostraram que com uma adição de até 20% de CBC ao cimento Portland ocorreu uma redução na permeabilidade da água e difusão de cloreto, uma sensível resistência à penetração e um desenvolvimento de alta resistência inicial.

A CBC apresenta como material cristalino predominante o quartzo que associado ao alto teor de SiO_2, fornece a esta uma característica de material não plástico, semelhante à areia fina usada pela indústria cerâmica. Pode-se dizer que o comportamento da CBC é semelhante a um material não plástico, diminuindo a retração linear das peças cerâmicas, durante a secagem e queima. Portanto, esse aditivo pode ser usado em substituição à areia fina.

Nos resultados de um programa experimental desenvolvido por Cordeiro et al (2008) para estudar o comportamento da CBC como uma mistura mineral em concretos convencionais e de alto desempenho com uma relação água/cimento de 0,60 e 0,35, respectivamente. Foram utilizadas substituições de 0%, 10%, 15% e 20% do cimento pela CBC. Os concretos com a cinza mostraram desempenho

melhor nos ensaios reológicos. O rendimento da CBC em concretos, diminuiu em comparação com os resultados observados para as misturas de referência, embora a viscosidade plástica não foi significativamente alterada pelo uso de CBC. O concreto contendo CBC apresentou os melhores resultados nos testes de permeabilidade do íon cloro.

Nunes et al. (2008) estudaram concretos com adição de CBC em substituição ao cimento Portland, na qual houve substituição de até 13% de cimento pelas cinzas. Obtiveram um grande aumento na resistência à compressão, onde o maior valor foi indicado pela substituição de 7% de cinza.

Cordeiro et al (2008) investigaram o papel da moagem e do tipo de moinho através de um estudo piloto para analisar diâmetro das partículas, atividade pozolânica e superfície específica da CBC. A moagem da CBC com 80% de material passante tem dimensões inferiores a 60μm e superfície específica Blaine de 300m².kg-1 permitindo que a CBC possa ser classificada como pozolana, independentemente do tipo de moinho e da moagem.

Cordeiro et al (2009) também caracterizaram uma amostra selecionada de cinza do bagaço, produzida sob condições de queima controladas em laboratório, com base em ensaios de fluorescência de raios X, difração de raio 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) e concluíram que a elevada atividade pozolânica da cinza do bagaço pode ser atribuída à presença de sílica amorfa, ao reduzido tamanho de partículas, à elevada superfície específica e à reduzida perda ao fogo.

Morales et al (2009) no estudo das características das condições de calcinação da cinza e da palha da cana-de-açúcar, onde as amostras da CBC foram calcinadas a 800 e 1000 °C mostraram que temperatura de calcinação não só influencia na composição mineralógica das cinzas, mas também na morfologia e composição das suas partículas individuais.

Paula et al (2009) mostraram nos resultados do trabalho que o bagaço de cana-de-açúcar utilizado proporcionou rendimento de cinza de bagaço de cana-de-açúcar (CBC) de 10%, com teor SiO2 de 84%. Combinando esses teores com o

aumento constante na geração deste resíduo em decorrência da expansão do setor sucroalcooleiro no Brasil, mostram que o CBC é uma fonte viável de adição mineral de cimentos, dependendo das características da sílica presente. A sílica encontrada na CBC apresentou-se tanto na fase amorfa quanto nas fases cristalinas de cristobalita e quartzo. Argamassas com maiores teores de cinza foram mais porosas e com maior absorção de água e os índices de atividade pozolânica comprovaram a reatividade da CBC. Os resultados dos ensaios de compressão aos 28 dias apontam a viabilidade de substituição de até 20% de cimento por CBC sem prejuízo da resistência.

Martins e Machado (2010) usaram a CBC em substituição à areia na produção de concretos e constataram valores máximos de resistência aos 28 dias com 20% de substituição da CBC em relação à massa do cimento.

Entretanto, segundo Santos (2006), é preciso evidenciar que, mesmo com as vantagens acima citadas, oriundas da utilização de pozolanas junto ao cimento Portland, o uso do material apresenta também algumas desvantagens. Exemplo disso é a exigência do uso de aditivos redutores de água em função do aumento da demanda de água nas misturas e a necessidade de cura adequada para que a reação pozolânica aconteça em sua plenitude, como no caso da cinza volante.

Além disso, com a substituição de parte do cimento por pozolana, os concretos passam a ter menores resistências iniciais, em função das reações pozolânicas serem mais lentas.

Portanto, através de um cruzamento de todos os dados dos pesquisados até aqui, pode-se considerar que existe uma grande possibilidade de atividade pozolânica da CBC, restando apenas determinar qual a combinação adequada da temperatura de queima, do tipo de resfriamento e a adoção de moagem no material para se conseguir o refinamento dos poros e a amorfidade desejada do material.

No entanto, para fins de viabilidade de uso, nesse trabalho será abordada a utilização da cinza da forma mais natural, ou seja, com menos tratamento possível a fim de permitir o seu emprego em grande escala.

3. Procedimento Experimental

Neste capítulo são apresentados os materiais utilizados nos experimentos, a definição do traço e a metodologia utilizada com o objetivo de se verificar o comportamento mecânico do concreto contendo a incorporação dos distintos tipos e percentuais de CBC.

Para analisar o comportamento dos concretos que contém as cinzas do bagaço da cana-de-açúcar das espécies SP911049, RB92579 e SP816949 provenientes do município de Pureza – Rio Grande do Norte (Coordenadas 217488,237 E, 9392890,759 N - ZONA 25, conforme o DATUM SIRGAS 2000), utilizou-se no desenvolvimento da parte experimental deste trabalho as três amostras de CBC, areia quartzosa, brita, Cimento Portland CP-II Z 32 RS aditivo e água isenta de impurezas.

A Figura 3.1 apresenta o esquema do procedimento experimental da dissertação.

Figura 3.1- Organograma do Procedimento Experimental.

3.1 Planejamento experimental

3.1.1 Escolha do traço

Para esse estudo foram feitos ensaios laboratoriais com o concreto padrão na proporção de 1:2:3 (cimento:areia:brita), para uma relação de água/cimento de 0,53 com a adição em relação a massa de cimento, de um por cento (1%) de aditivo superplastificante TecMult 400. É relevante ainda destacar que foi escolhido o referido traço, por ser economicamente viável, pois atende bem as especificações de resistência à compressão desejada com uma economia razoável.

3.1.2 Cálculo dos quantitativos

Após a definição do traço empregado foi realizado o cálculo dos quantitativos dos materiais utilizados com base nas exigências das normas e na quantidade de ensaios a serem realizados. Na produção do concreto foram empregadas as seguintes taxas de adição ao cimento por CBC: 0, 10, 20 e 30% (Tabela 3.1).

Para cada adição de CBC foram moldados ao todo 13 corpos-de-prova cilíndricos (10cm diâmetro x 20cm altura) por traço, segundo a NBR 5738/ 2008 para atender aos ensaios de Resistência à compressão, Análise microestrutural, Porosidade total, Absorção e Índice de Vazios cujo quantitativo está evidenciado na Tabela 3.2.

Dessa forma, considerando as proporções da CBC adotadas, 10%, 20% e 30% e da produção do concreto padrão, produziram-se quatro traços diferentes, completando um total aproximado de 22,1 litros de concreto produzido.

Na Tabela a 3.3 está evidenciada a quantidade de material que foi empregado nos ensaios da fabricação do concreto. Porém, deve-se ressaltar que a quantidade de CBC não participou nos cálculos do volume de material. A Tabela 3.4 apresenta os quantitativos utilizados na caracterização dos materiais e produção do concreto.

Tabela 3.1 - Formulação dos concretos.

Concreto	Tipo de CBC	Traço do concreto	Fator a/c	Teor de aditivo (%)	Teor da cbc (%)
CP	-	1:2:3	0,53	1	0
CA10%	SP 911049	1:2:3	0,53	1	10
CA20%	SP 911049	1:2:3	0,53	1	20
CA30%	SP 911049	1:2:3	0,53	1	30
CB10%	RB 92579	1:2:3	0,53	1	10
CB20%	RB 92579	1:2:3	0,53	1	20
CB30%	RB 92579	1:2:3	0,53	1	30
CC10%	SP 816949	1:2:3	0,53	1	10
CC20%	SP 816949	1:2:3	0,53	1	20
CC30%	SP 816949	1:2:3	0,53	1	30

LEGENDA:
CP - Concreto padrão com 0% de cinza.
CA10% - Concreto com 10% de cinza A
CA20% - Concreto com 20% de cinza A
CA30% - Concreto com 30% de cinza A
CB10% - Concreto com 10% de cinza B
CB20% - Concreto com 20% de cinza B
CB30% - Concreto com 30% de cinza B
CC10% - Concreto com 10% de cinza C
CC20% - Concreto com 20% de cinza C
CC30% - Concreto com 30% de cinza C

Tabela 3.2 - Quantitativo de corpo-de-prova por traço.

Ensaios	NBR	Idade dos ensaios			Total parcial
		7 dias	28 dias	91 dias	
Resistência à compressão	5739/2007	3	3	3	9
Porosidade/ Absorção	9778/2009		3		3
Extra	-	-	-	-	1
	TOTAL				**13**

Tabela 3.3 - Volume total do concreto produzido por traço.

	Proporção em massa (kg)				
	Cimento	**Areia**	**Brita**	**Aditivo**	**Água**
Traço de referência	1	2	3	0,01	0,53
Fator multiplicador	8	8	8	8	8
Traço aumentado	8	16	24	0,08	4,25
Massa esp. real estimada (kg/dm^3)	2,95	2,60	2,70	1, 205	1
Volume dos materiais (litros)	2,71	6,15	8,9	0,06	4,25
Volume do concreto produzido com o traço aumentado				**22,1litros**	

Tabela 3.4 - Quantidade de materiais e quantitativos para os ensaios.

	Quantidade dos materiais (kg)						
	CIMENTO	**AREIA**	**BRITA**	**ADITIVO**	**CA10% + CA20% + CA30%**	**CB10% + CB20% + CB30%**	**CC10% + CC20% + CC30%**
Produção do concreto	150	250	400	1,5	8	8	8
Caracterização dos materiais	10	15	20	-	8	8	8
Total	**160**	**265**	**420**	**1,5**	**16**	**16**	**16**

3.2 Caracterização dos materiais

Todos os materiais empregados nessa experiência foram submetidos a ensaios físicos de acordo com as normas prescritas pela ABNT.

3.2.1 Cimento

O tipo de cimento utilizado nesta pesquisa foi o CPII Z 32 RS de resistência 32 MPa aos 28 dias, proveniente de um único lote de fabricação. Ao todo foram

comprados 200 kg de cimento e guardados em sacos plásticos, suspensos do chão e afastado das paredes.

Para caracterização do cimento foram realizados os ensaios normatizados para o cimento Portland, segundo a ABNT para analisar características físicas e químicas da argamassa padrão. Os ensaios realizados para comprovar a viabilidade do cimento estão elucidados nos subitens a seguir.

3.2.1.1 Ensaio de início de pega

Para a obtenção do tempo de início de pega, foi utilizada a norma NBR NM 65/2003, que define esse tempo como sendo o intervalo transcorrido desde a adição da água[19] ao cimento, até o momento em que a agulha de Vicat penetra na pasta até uma distância de 4 ± 1 mm da placa da base O resultado é expresso em horas e minutos, com uma aproximação de 5 minutos.

3.2.1.2 Ensaio de expansibilidade

O ensaio consiste em preencher três agulhas de Le Chatelier com uma pasta de cimento. Essas a agulhas são fechadas dos dois lados com uma placa de vidro lubrificada com desmolde. Posteriormente, são colocadas em cura dentro de um recipiente com a água a temperatura de 23 ± 2 ºC. A abertura da agulha é medida antes e depois dos 7 dias de cura e o resultado do ensaio é expresso em milímetros, pela diferença das duas medidas. A norma que padroniza o ensaio é a NBR 11582/2012.

[19] Quantidade da água encontrada no ensaio de consistência do cimento, conforme a NBR NM 43/2003.

3.2.1.3 Ensaio de finura

A realização do ensaio de finura do cimento foi baseada na norma NBR 11579/2012 que especifica a determinação do índice de finura do cimento através do material retido na peneira de 75 µm (n° 200 da ABNT) em porcentagem de massa (Equação 3.1).

$$F = \left(\frac{R \times C}{M} \right) \times 100 \tag{3.1}$$

3.2.1.4 Ensaio de resistência do cimento

O ensaio de resistência do cimento é relevante antes da execução de quaisquer ensaios com o concreto, pois ela aprova ou não a resistência à compressão especificada pelo fabricante. Para esse ensaio é preparada uma argamassa com ajuda de um misturador mecânico para futuro rompimento à compressão. A norma que regulamenta esse ensaio é a NBR 7215/1997.

As amostras de argamassa para o rompimento podem ser visualizadas na Figura (3.2).

Figura 3.2 – Corpos de prova (10x5cm) do ensaio de resistência do cimento

3.2.1.5 Ensaio de massa específica real (Lê Chatelier com querosene)

O Ensaio de Massa Específica Real é regulamentado pela NBR NM 23/2001. Para tal ensaio coloca-se no frasco de Le Chatelier 250ml de querosene e em seguida deposita-se o frasco em uma vasilha com água para a equalização da temperatura.

Aguarda-se até que o atinja a temperatura da água e faz-se a 1ª leitura (Lo) na parte inferior do menisco. A seguir, com auxílio de uma espátula e um funil de vidro coloca-se no frasco os 60g de cimento.

Novamente o conjunto é colocado em uma vasilha com água, no qual se aguarda o atingir do equilíbrio de temperatura e faz-se a 2ª leitura (Lf). Portanto, o volume do cimento será = Lf – Lo.

Então a densidade real é obtida pela fórmula:

$$\rho esp\ (g/cm^3) = \frac{M}{(Lf - Lo)} \tag{3.2}$$

Sendo,

ρesp – Massa Específica;

M – Massa do cimento kg

L – Leitura final da escala, dm^3;

Lo – Leitura da escala do frasco somente com água, dm^3.

3.2.2 Areia

A areia empregada nesse experimento foi previamente seca em estufa por 72h e depois foi armazenada em baias de estoque em ambiente de laboratório fechado. Para a caracterização desse material foram realizados os ensaios de

Massa Específica Real e Massa Unitária, como também de Composição Granulométrica.

3.2.2.1 Massa específica real e massa unitária

Na realização do ensaio da massa específica real utilizou-se o Frasco de Chapman. Tal ensaio foi baseado na norma NBR NM 52/2009 e calculado através da Equação 3.3.

$$\rho esp\ (g/cm^3)\ = \frac{M}{(Lf - Lo)} \tag{3.3}$$

Sendo,

ρesp – Massa Específica;

M – Massa do agregado, em kg;

Lf – Leitura final da escala, dm^3;

Lo – Leitura da escala do frasco somente com água, dm^3.

O ensaio da massa unitária da areia foi realizado por meio de uma caixa metálica com as dimensões padronizadas (NBR NM 45/2006.) e o resultado é obtido pela Equação 3.4.

$$\rho ap(kg/dm^3\ ) = \frac{(Mar - M)}{V} \tag{3.4}$$

Sendo,

ρap – Massa Unitária;

Mar – Massa do recipiente + agregado, em kg;

M – Massa do recipiente, em kg;

V – Volume do recipiente, em dm^3.

3.2.2.2 Composição granulométrica

O ensaio de granulometria possui como finalidade a classificação das partículas do agregado quanto ao tamanho e as frações correspondentes a cada tamanho (NBR NM 248/2003).

3.2.3 Brita

Foi adquirido 1m³ de brita de 19mm para a realização da parte experimental, que engloba caracterização dos materiais e produção do concreto. Todo o material foi seco em estufa por 48h e em seguida foi armazenado numa baia em ambiente de laboratório fechado.

Para a garantia da qualidade do material utilizado foi também necessário fazer a caracterização da brita a qual contou com os seguintes ensaios de Massa específica real e massa unitária e de Composição granulométrica.

3.2.3.1 Massa específica real e massa unitária

O ensaio da massa específica real do agregado graúdo foi feito de acordo com a norma NBR NM 53/2009 e a massa unitária obedeceu à norma NBR NM 45/2006.

3.2.3.2 Composição granulométrica

A caracterização granulométrica da brita é semelhante à caracterização granulométrica da areia (NBR NM 248/2003). No entanto, a diferença reside na quantidade de material utilizado na realização do ensaio.

3.2.4 Água

Para a produção do concreto foi usada a água derivada da rede pública de distribuição da Companhia de Águas e Esgotos do Rio Grande do Norte (CAERN) sendo potável e de acordo com a NBR 12.654/1992.

3.2.5 Aditivo

Os aditivos são substâncias adicionadas a mistura do concreto visando dois objetivos principais: aumentar as qualidades do concreto e/ou diminuir os seus pontos fracos. Neste trabalho, foi utilizado o aditivo superplastificante TecMult 400.

Os aditivos superplastificantes têm o mesmo princípio de funcionamento dos aditivos plastificantes. Porém, pode-se diferenciá-los quanto à intensidade da ação, pois enquanto o plastificante consegue reduzir até 6% de água, o superplastificante consegue chegar à marca dos 12%. Os dados técnicos do aditivo utilizado foram postados na Tabela 3.5.

Tabela 3.5 - Dados técnicos do aditivo superplastificante TecMult.

TECMULT – Ficha técnica					
Linha de Produtos TecMult	**Recomendações técnicas para aplicação**	**Dosagem recomendada para cada 100kg de cimento**	**Aspectos/cor**	**pH (ABNT 10908)**	**Massa Específica (ABNT 10908)**
TecMult-400	Excelente poder dispersante permitido a redução das relações água/cimento e aumento dos tempos de pega	300 a 1000 ml	Líquido castanho escuro	7,5 +/- 1,0	1,205 ± 0,02 g/cm^3

Fonte: TecMult (2012)

3.2.6 Cinza do bagaço da cana-de-açúcar

Para a fomentação deste estudo, como mencionado anteriormente, utilizou-se espécies distintas de CBC (Figura 3.3). Pode-se constatar que existem várias espécies que apresentam características diferentes. Essas estão apresentadas na Tabela 3.6. É importante frisar que as siglas antes dos números de referência das variedades de cana-de-açúcar são atribuídas de acordo com o local de origem, no caso das siglas SP e RB, correspondem a “São Paulo” e “República do Brasil” respectivamente.

Figura 3.3 - Variedades de cana-de-açúcar.

Fonte: AGEITEC (2012)

http://www.agencia.cnptia.embrapa.br/gestor/cana-de-acucar/arvore/CONTAG01_42_1110200717570.html

Tabela 3.6 - Características agroindustriais das variedades de cana-de-açúcar

Variedade	Parentais	Características agroindustriais
SP 911049	SP80-3328 X SP 701143	• Precocidade e alto teor de sacarose, sendo recomendada para colheita no início da safra; • Mais produtiva que a RB72454 nos ambientes de produção desfavoráveis; • Hábito semi-ereto com médio teor de fibra; • Floresce pouco, mas isoporiza; • Resistente às principais doenças e pragas, sendo considerada de suscetibilidade intermediária ao carvão e à cigarrinha.
RB92579	RB75126 X RB72199	• Excelente produtividade agrícola, ótimo perfilhamento, bom fechamento da entrelinha, ótima brotação das socarias, garantindo longevidade dos canaviais; • Porte semi-ereto, com ótima colheitabilidade; • Boa recuperação após períodos de seca; • Responsiva à irrigação e muito eficiente no uso da água; • Eficiência no uso dos principais nutrientes; • Ótimo teor de sacarose, maturação média, recomendada para colheita do meio para o final de safra; • Florescimento baixo; • Tolerante em relação ao ataque da broca comum, resistente a ferrugem marrom e escaldadura das folhas e moderadamente resistente ao carvão; • Ausência de amarelinho.
SP816949	-	• Boa brotação com maturação tardia; • Apresenta bom rendimento de transporte e colheita mecânica; • Boa brotação de soca, porém possui alguma restrição e susceptível a algumas doenças fungicas sendo não exigente de solo.

Fonte: Associação dos Fornecedores de Cana Guariba (2012).

Para organizar a variedade de cinzas utilizadas, nesse estudo atribuiu-se nomenclaturas especificadas de acordo com a Tabela 3.7 a seguir:

Tabela 3.7 - Variedades de CBC e respectiva nomenclatura atribuída.

Variedade de CBC	Nomenclatura
SP911049	A
RB92579	B
SP816949	C

As cinzas foram coletadas no lugar de despejo da caldeira de forma aleatória, retirando pequenas quantidades de partes diferentes de cada montante do resíduo. Estas amostras são resultados do processo de queima a mais ou menos 900 ºC do bagaço de cana-de-açúcar (Figura 3.4 a; b; c; d).

As amostras passaram por uma observação superficial com a finalidade de verificação de sua cor e a sua homogeneidade. Ainda, foi efetivado um peneiramento prévio para a obtenção de partículas uniformes e eliminação de possíveis impurezas. Foi utilizado nesta pesquisa o material passante na peneira de malha 1,2 mm e descartados os que ficaram retidos na mesma peneira. A seguir foram depositadas em uma estufa por três dias com temperatura de 105 ºC com a finalidade de eliminar suas umidades.

3.2.6.1 Granulometria

Posteriormente, com a intenção de determinar as características granulométricas (tamanho dos grãos e sua respectiva distribuição granulométrica) das CBC foram feitos ensaios de granulometria a laser com o granulômetro a laser de marca CILAS modelo 1180 L com Faixa de 0,04 mμ – 2500 mμ / 100 Classes, Ultrassom 60s, Concentrações de 159,163 e 131 respectivamente a CA, CB e CC. Foi também realizado o ensaio de granulometria por peneiramento de acordo com a NBR 7211/2009.

(a) – Pátio de queima do bagaço da cana-de-açúcar

(b) – Forno de queima do bagaço da cana-de-açúcar

(c) – Queima do bagaço da cana-de-açúcar

(d) – Pátio de despejo da cinza do bagaço da cana-de-açúcar

Figura 3.4 Obtenção das CBC

3.2.6.2 Massa específica real

O ensaio de massa específica real foi idêntico ao do cimento e seguiu a mesma norma (subitem 3.2.1.5).

3.2.6.3 Massa unitária

O ensaio de massa unitária foi semelhante ao dos agregados e obedeceu também a mesma norma (subitem 3.2.2.1).

3.2.6.4 Fluorescência de raios X (FRX)

A composição química das variedades de CBC foi determinada por fluorescência de raios X (FRX) através do equipamento de marca SHIMADZU modelo EDX720 com Tensão no tubo de 15 keV (Na a Sc) e 50 keV (Ti a U), corrente no tubo de 414 e 66 µA; 428 e 69 µA; 428 e 80 µA respectivamente a CA, CB e CC, Colimador de 10 mm, Tempo real de integração de 200 s, Tempo morto do detector de 41 e 39%;41 e 40%; 39 e 39% (CA; CB; CC) sob vácuo e detector de Si(Li), refrigerado com nitrogênio líquido. Foram utilizadas, pequenas porções de CBC de todas as variedades previamente secas em estufa por 72 horas e armazenadas em cápsulas plásticas.

Os resultados obtidos foram apresentados na forma percentual dos principais óxidos: SiO, AlO, FeO, CaO, NaO, KO, MnO, TiO, MgO e BaO. Vale ainda salientar que, pela limitação do método, somente elementos entre Na (12) e U (92), na tabela periódica, são detectados. A análise química por FRX utiliza-se do método semiquantitativo realizado numa atmosfera a vácuo.

3.2.6.5 Difração de raios X (DRX)

A análise mineralógica das CBC foi apurada mediante o ensaio de Difratômetro de raios X (DRX) no equipamento de marca SHIMADZU, modelo XRD-7000 com Tubo de Cu (λ= 1,55056 Â), Tensão 40 kV, Corrente 30mA, Varredura 2º a 80º para 2θ; Velocidade 5º/min, Passo de 0,02º/passo e Escaneamento contínuo.

A estimativa das fases das cinzas foi determinada pela comparação entre os picos gerados no difratograma com cartas padrões do programa de computador JCPDF, cadastradas no Internacional Centre for Diffraction Data (ICDD). Os resultados dos ensaios realizados são apresentados na forma gráficos com picos de cristalinidade dos elementos constituintes. Para o ensaio com as CBC foi utilizado o método de pó.

3.2.6.6 Pozolanicidade

O ensaio de Pozolanicidade das CBC foi realizado com o cimento de acordo com a NBR 5752/2012.

O procedimento desse ensaio é semelhante ao de resistência do cimento apresentado no subitem 3.2.1.4 deste trabalho.

No entanto, o ensaio de Pozolanicidade das CBC difere do ensaio resistência do cimento porque parte do cimento é substituído pelas CBC, e as condições de cura são realizadas em ambientes com temperatura controlada.

3.2.6.7 Ensaio de Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV)

Para o ensaio do MEV foi utilizado o equipamento de marca HITACHI modelo TM3000, com Filamento de Tungstênio, Harpini pré-centralizado, Magnificação de 15 a 30.000X, Tensão de Aceleração de 5KV em modo de observação de superfície e 15 KV em modo normal, modo de análise e alto contraste.

No ensaio de Microscopia Eletrônica de Varredura, um feixe de elétrons é incidido numa pequena região da amostra. Quando isso acontece são gerados sinais diferentes, tais como elétrons secundários, elétrons retroespalhados, dentre outros. Esses sinais são detectados e transformados em sinais elétricos que vão permitir a formação da imagem da superfície, composição de fases e análise composicional.

Para uma melhor abordagem acerca da caracterização das CBC foi efetuada a espectrografia por dispersão de energias (EDS) no equipamento de marca A-STREAM, modelo SWIFTED3000, Sem requerimento de Nitrogênio Líquido com Área de detecção de 30mm^2; Energia de resolução de 161eV em Cu-Kα (equivalente a 137eV em Mn-Kα) e Analisa elementos de Sódio a Urânio (B5 a U92). Esse procedimento permite uma análise química elementar por meio de Raios X de um ponto específico em um dado volume em micrômetros cúbicos. A análise por EDS permite obter a composição de um material em termos qualitativos, quantitativos e semiquantitativos. Estes resultados são originados da comparação da intensidade das riscas espectrais, características do material com os espectros de referências, previamente computados em bancos de dados.

3.2.7 Concreto

Para a fabricação dos concretos utilizados na fase experimental desse trabalho, foram pesados separadamente todos os materiais (cimento, areia, brita, resíduo, aditivo e água) que entram na produção do concreto.

Os agregados e o cimento foram pesados em balança digital com capacidade de carga de 15.000g e resolução de 5g, marca FILIZOLA, modelo CS 15. Após a pesagem, os materiais acima mencionados foram estocados separadamente em baldes para posterior uso na produção do concreto.

A massa da CBC necessária para produção do concreto foi determinada em balança digital de marca OKAUS, modelo Adventurer-Pro, com capacidade de carga de 8.100g e resolução de 0,1g. Vale salientar que o tipo de balança foi mudado, visto que a utilização deste resíduo se dará em pequenas concentrações em relação

à massa dos outros materiais. O aditivo utilizado na pesquisa em questão também foi mensurado na balança acima citada.

Na elaboração dos concretos, como já havia sido mencionado, se manteve constante a massa do cimento, agregados e água, variando-se apenas o teor de CBC de 0%, 10%, 20%, e 30% em relação à massa do cimento.

A mistura foi realizada por meio de uma betoneira de eixo inclinado de marca Menegotti com capacidade nominal de 120 litros.

Antes de iniciar-se a fabricação do concreto foi necessário realizar uma lubrificação na betoneira, mediante a colocação de água, molhando-se assim toda a parte interna da cuba com o intuito de que a água de amassamento não fosse absorvida pelo equipamento.

A sequência de introdução dos materiais na betoneira seguiu a seguinte ordem:

a) Com a betoneira ligada, colocou-se a metade da água de amassamento misturada previamente com o aditivo;

b) Colocou-se toda a quantidade de brita;

c) Adicionou-se o cimento. Na produção dos concretos contendo as cinzas, estes foram previamente misturados com o cimento;

d) Colocou-se o agregado miúdo;

e) O restante da água foi acrescentado;

f) Após todos os materiais serem colocados na betoneira, esta permaneceu em movimento por 5 minutos;

g) O concreto fresco foi descarregado diretamente no carrinho de mão previamente lubrificado com água para que não absorvesse a água de amassamento;

h) Foi realizado o ensaio de abatimento do tronco de cone de acordo com as recomendações da NBR NM 67/1998;

i) Com os moldes cilíndricos de 100 mm de diâmetro com 200 mm de altura devidamente lubrificada, foi despejado concreto dentro destes para a produção dos corpos de prova;

j) O adensamento do concreto foi realizado de acordo com a Norma NBR 5738/2008;

k) Após a moldagem, o concreto foi deixado em repouso durante 24 horas, protegido do sol e em ambiente ventilado;

l) Depois dos 24 horas em repouso, os corpos-de-prova foram desmoldados e submetidos ao processo de cura por imersão durante 7, 28 e 91 dias, em consequência do tipo de ensaio.

3.2.7.1 Ensaio do concreto no estado fresco

3.2.7.1.1 Consistência

Como já foi referenciado anteriormente foram determinadas as consistências para cada traço por meio do ensaio de abatimento do tronco de cone, segundo a norma NBR NM 67/1998.

3.2.7.2 Cura

O procedimento de cura adotado nesse experimento foi a úmida regida pela norma NBR 9479/2006, na qual as amostras são imersas em tanque com água até a data dos ensaios prescritos pelas normas dos diferentes ensaios.

3.2.7.3 Ensaios no concreto no estado endurecido

3.2.7.3.1 Porosidade, absorção, índice de vazios e massa específica real

Aos 28 dias de cura úmida foram realizados ensaios de absorção por imersão, índice de vazios, porosidade total e massa específica real para cada

mistura. Os procedimentos para determinar essas propriedades do concreto endurecido segundo a NBR 9778/2009 são:

a) Imersão das amostras em água a temperatura de 20° C, até que as determinações sucessivas de massas realizadas a intervalos de 24horasmostrassem um aumento inferior a 0,5%. As massas das amostras (Mi) são medidas numa balança hidrostática;

b) As amostras são removidas da água e enxugadas com um pano úmido para remover a umidade superficial. Nessa etapa as massas saturadas são determinadas (Msat) e,

c) Depois seca-se o material em estufa a 105° C até que a determinação sucessivas de massas em intervalo de 24 horas, apresente uma redução de massa inferior a 0,5%. Em seguida, estas são resfriadas à temperatura ambiente para posterior determinação da massa seca em estufa (Ms).

Com todas as massas acima citadas determinadas, calcula-se o índice de vazios (Iv), a absorção por imersão (Abimersão), a porosidade total (Ptotal) e massa específica real (MEreal).

A seguir estão apresentadas as equações para a determinação das características físicas (Equações 3.5, 3.6, 3.7 e 3.8).

$$Abimersão = \frac{Msat - Ms}{Ms}\ 100 \tag{3.5}$$

$$Iv = \frac{Msat - Ms}{Msat - Mi}100 \tag{3.6}$$

$$MEreal = \frac{Ms}{Ms - Mi}100 \tag{3.7}$$

$$Ptotal\ = \frac{Msat - Ms}{VT}\ 100 \tag{3.8}$$

Sendo *Ms* a massa seca da amostra; *Mi* é a massa imersa da amostra, *Msat* é a massa saturada da amostra e *Vt* é volume total da amostra (1570 cm^3).

3.2.7.3.2 Resistência à compressão axial

O ensaio de resistência à compressão foi realizado aos 7, 28 e 91 dias e seguiu a prescrição da norma NBR 5739 (ABNT, 2007). Para o referido ensaio foi utilizada a Máquina Universal de Ensaios Mecânicos da marca AMSLER, suíça nº 699/474, com capacidade de carga de 100 t, no Laboratório de Concreto do Núcleo de Tecnologia da UFRN.

Na data de rompimento os corpos-de-prova foram retirados da água e passaram por um processo de capeamento com enxofre, com o objetivo de regularizar a superfície de carregamento das amostras e assegurar uma maior confiabilidade nos resultados do ensaio.

3.3.7.3.3 Análise microestrutural

A análise da microestrutura do concreto foi realizada por meio do microscópio eletrônico de varredura, localizado no Laboratório Institucional de Microscopia Eletrônica de Varredura do Centro de Tecnologia do Gás e Energias Renováveis (CTGAS-ER). Foram extraídas duas amostras de concreto para a análise microestrutural, uma com 30% cinza A e a outra sem cinza (concreto de referência) para fazer a comparação. O processo da obtenção das amostras acima descritas obedeceu a seguinte ordem:

a) Os corpos-de-prova cilíndricos de 100x200mm foram serrados ao meio, dividindo estes em duas partes iguais;

b) Foi retirada em uma das partes uma fatia em forma de bolacha com 2cm de altura com ajuda da serra elétrica;

c) Foram realizados vários cortes nas fatias de concreto na direção longitudinal com 2cm de espaçamento, resultando assim em amostras prismáticas de 2cm de lados com alturas variadas;

d) Com o intuito de evitar a fratura na zona de transição entre pasta de cimento e o agregado, as amostras foram congeladas com nitrogênio líquido e

depois fraturadas com ajuda de uma talhadeira, obtendo-se assim, pedacinhos de concretos com alturas de aproximadamente 5mm.

As amostras de concreto passaram por um tratamento prévio antes de serem submetidas à análise microestrutural, denominado metalização. Nesse processo, uma cobertura ultrafina de material eletricamente condutiva é depositada tanto por evaporação de alto vácuo quanto por *sputter* de baixo vácuo na amostra. Este procedimento é necessário para prevenir a acumulação de campos elétricos estáticos no espécime devido irradiação elétrica durante a produção das imagens. Nesse trabalho foi utilizado o elemento ouro para a metalização das amostras de concreto.

4. Resultados e discussões

O capítulo a seguir, expõe os resultados obtidos na parte de caracterização dos materiais utilizados na produção do concreto. As discussões referentes aos resultados dos ensaios de concretos contendo CBC são apresentadas posteriormente mediante uma análise comparativa entre estes e o concreto padrão (sem adição de CBC).

4.1 Caracterização dos materiais

4.1.1 Cimento

4.1.1.1 Ensaio de início de pega

Com um fator água cimento de 0,338 obteve-se uma pasta de consistência normal dentro dos parâmetros estipulados pela norma. O início de pega se deu depois de duas horas do início do ensaio o que é considerado satisfatório, já que a norma estabelece um tempo mínimo de início de pega de uma hora. A Tabela 4.1 mostra o resultado do ensaio de início de pega.

Tabela 4.1 - Ensaio de início de pega do cimento Portland.

Consistência da pasta		**Pega (hora e minuto)**	
Água	169 ml	Inicio	08:00
Cimento	500 g	Término	10:05
Água/Cimento	0,338	Inicio de Pega	2:05

4.1.1.2 Ensaio de expansibilidade

A média do resultado do ensaio de expansibilidades foi de um milímetro, o que é aceitável, pois a norma estabelece um valor máximo de 5mm para que o cimento seja utilizado.

4.1.1.3 Ensaio de finura

A norma NBR 11578/1997 estabelece uma finura máxima de 12. No ensaio em questão foi obtida uma média de 2,6.

4.1.1.4 Resistência à compressão

Os resultados dos ensaios de resistência à compressão do cimento são apresentados a seguir na Tabela 4.2 e na Figura 4.1.

Os resultados obtidos no ensaio de resistência à compressão do cimento foram satisfatórios, pois estes atenderam perfeitamente as especificações da norma. A norma afirma que as resistências para as idades de 3, 7 e 28 dias deve ser no mínimo 10, 20 e 30 MPa, como foi possível observar com 7 dias o cimento já havia atingido resistência superior a 20 MPa.

Tabela 4.2 - Resistência à Compressão do cimento

Resistência à compressão	
Idade (dias)	**Tensão (MPa)**
3	24,13398
7	27,72542
28	32,90881

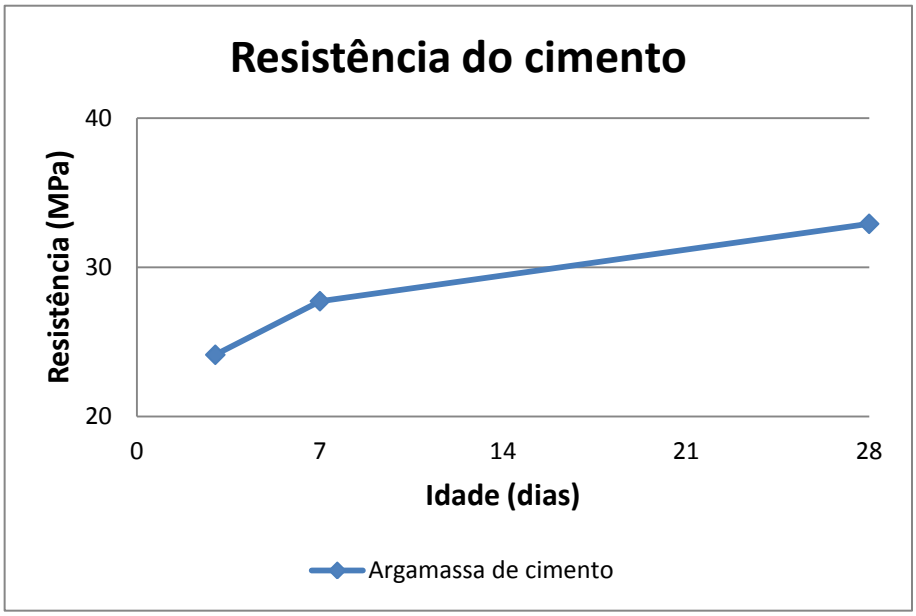


Figura 4.1 - Resistência a Compressão do Cimento.

4.1.1.5 Ensaio de massa específica real

Como resultado do ensaio de massa específica real foi encontrado um valor médio de 2,97 g/cm³, o que é considerado normal para esse tipo de cimento.

4.1.2 Areia

4.1.2.1 Composição granulométrica

De acordo com a composição granulométrica apresentada na Tabela 4.3 e Figura 4.2 e com os valores do módulo de finura do agregado miúdo na Tabela 4.4, foi possível classificar o agregado miúdo como sendo areia de granulometria média.

Tabela 4.3 - Frações correspondentes a cada tamanho do agregado miúdo.

Diâmetro da peneira (mm)	Retido (g)	Porcentagem (%)		
		Retida	Acumulada	Passante
4,8	10,30	1,03	1,03	98,97
2,4	67,00	6,70	7,73	92,27
1,2	157,00	15,70	23,43	76,57
0,6	306,60	30,66	54,09	45,91
0,3	325,20	32,52	86,61	13,39
0,15	117,40	11,74	98,35	1,65
<0,15	16,50	1,65	100,00	0,00
TOTAL	**1000,00**	**100,00**		

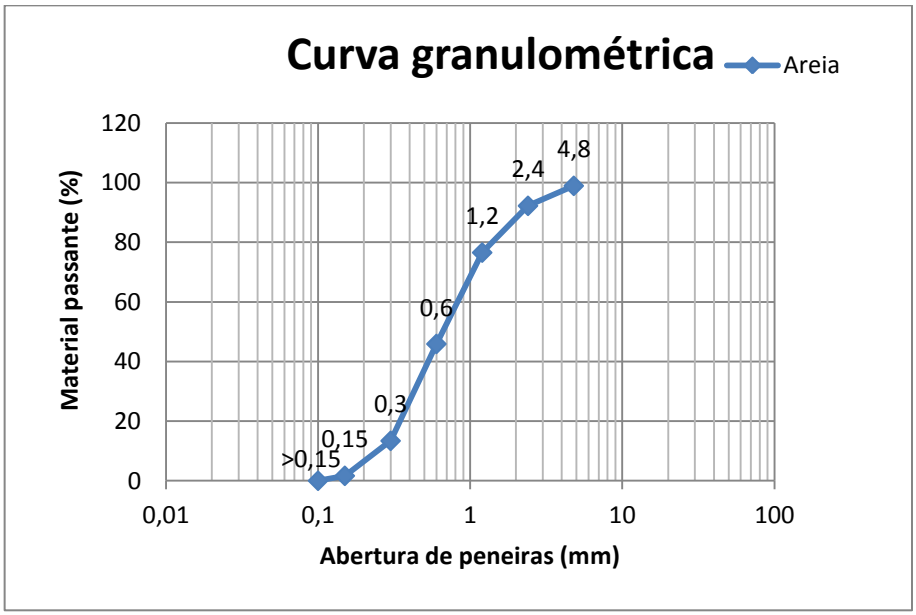


Figura 4.2 – Curva granulométrica do agregado miúdo.

Tabela 4.4 - Módulo de finura do agregado miúdo.

Característica granulométrica	Resultado
Diâmetro Máximo (mm)	4,80
Módulo de Finura	2,71

4.1.2.2 Massa específica real e massa unitária

Os resultados de massa específica real e unitária mostrados na Tabela 4.5 são considerados satisfatórios para a produção de concretos de boa qualidade por serem valores comumente encontrados na prática.

Tabela 4.5 - Ensaio de massa específica real e massa unitária.

Massa específica	Resultado
Massa específica real (kg/dm^3)	2,61
Massa unitária (kg/dm^3)	1,46

4.1.3 Brita

4.1.3.1 Composição granulométrica

A Figura 4.3 mostra a curva granulométrica da brita. De acordo com as porcentagens retidas e acumuladas na Tabela 4.6 de composição granulométrica, foi possível classificar a brita como sendo 19 mm com um módulo de finura de 6,73 (Tabela 4.7).

Tabela 4.6 - Composição granulométrica do agregado graúdo.

Diâmetro da peneira (mm)	Retido (g)	Porcentagem (%)		
		Retida	Acumulada	Passante
25	0,00	0,00	0,00	100
19	131,00	2,62	2,62	97,38
12,5	2519,70	50,39	53,01	46,99
9,5	1499,80	30,00	83,01	16,99
6,3	670,80	13,41	96,43	3,57
4,8	70,50	1,42	97,84	2,16
Ø<04,8	108,20	2,16	100,00	0,00
TOTAL	**5000,00**	**100**		

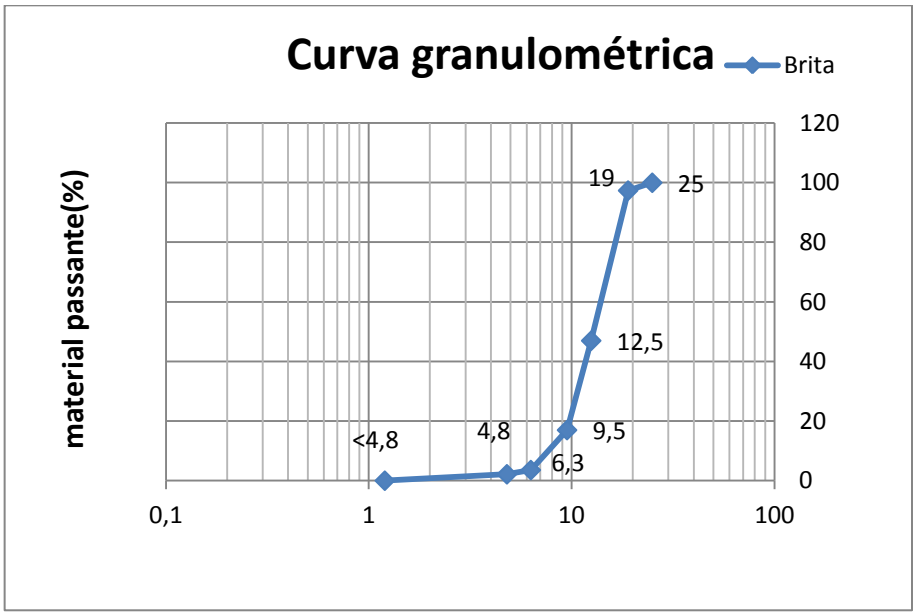


Figura 4.3 – Curva granulométrica da brita.

Tabela 4.7 – Módulo de finura do agregado graúdo.

Ensaio	Resultado
Diâmetro Máximo (mm)	19,00
Módulo de Finura	6,73

4.1.3.2 Massa específica real e massa unitária

Os resultados obtidos no ensaio de massa específica real e unitária do agregado graúdo são apresentados abaixo na Tabela 4.8.

Normalmente são utilizados agregados graúdos com massa específica real variando de 2,60 a 2,70kg/dm³ e massa unitária compreendida entre 1,3 a 1,75 kg/dm³. Como se pode notar, os valores obtidos na Tabela 4.8 se enquadram muito bem nesse intervalo.

Tabela 4.8 - Resultados do ensaio de massa específica real e unitária do agregado graúdo.

Massa específica	Resultado
Massa especifica real (kg/dm^3)	2,71
Massa unitária (kg/dm^3)	1,55

4.1.4 Cinzas do bagaço da cana-de-açúcar

4.1.4.1 Composição granulométrica

As composições granulométricas das cinzas A, B e C estão explicitadas nas Tabelas 4.9, 4.10 e 4.11 e Figuras 4.4, 4.5 e 4.6 a seguir. As composições granulométricas das cinzas mostraram-se bem semelhantes entre si, no entanto a cinza B apresentou módulo de finura 8% menor em comparação com as outras variedades (Tabela 4.12) e todas apresentaram um diâmetro máximo 1,2mm.

Tabela 4.9 - Granulometria cinza A (SP911049)

Granulometria				
Diâmetro da peneira(mm)	**Retido (g)**	**Porcentagem (%)**		
		Retida	**Acumulada**	**Passante**
4,8	0	0	0	100
2,4	0	0	0	100
1,2	0,4	0,08	0,08	99,92
0,6	65	13	13,08	86,92
0,3	118,2	23,64	36,72	63,28
0,15	196,8	39,36	76,08	23,92
Ø<0,15	119,6	23,92	100	0
TOTAL	**500**	**100**		

Tabela 4.10 - Granulometria cinza B (RB92579)

Granulometria				
Diâmetro da peneira (mm)	**Retido (g)**	**Porcentagem (%)**		
		Retida	**Acumulada**	**Passante**
4,8	0	0	0	100
2,4	0	0	0	100
1,2	0,1	0,02	0,02	99,98
0,6	41	8,2	8,22	91,78
0,3	118,6	23,72	31,94	68,06
0,15	213,3	42,66	74,6	25,4
Ø<0,15	127	25,4	100	0
TOTAL	**500**	**100**		

Tabela 4.11 - Granulometria cinza C (SP816949)

Granulometria				
Diâmetro da peneira (mm)	**Retido (g)**	**Porcentagem (%)**		
		Retida	**Acumulada**	**Passante**
4,8	0,00	0,00	0,00	100,00
2,4	0,00	0,00	0,00	100,00
1,2	0,10	0,02	0,02	99,98
0,6	63,20	12,64	12,66	87,34
0,3	122,40	24,48	37,14	62,86
0,15	194,40	38,88	76,02	23,98
Ø<0,15	119,91	23,98	100,00	0,00
TOTAL	**500,00**	**100,00**		

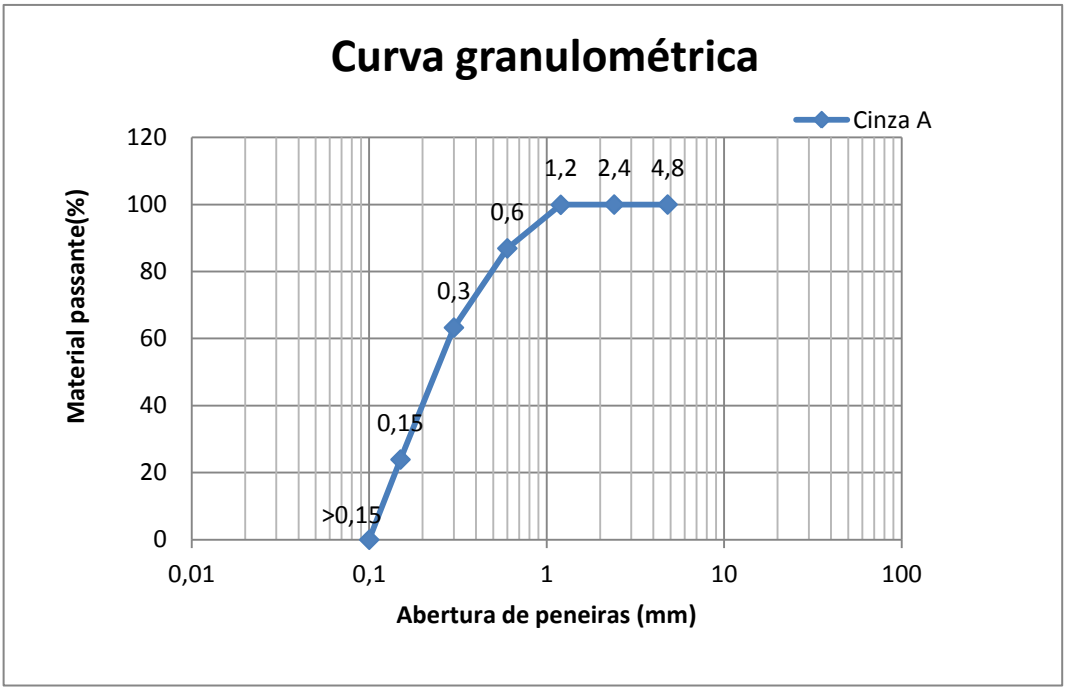


Figura 4.4 – Curva granulométrica da cinza A.

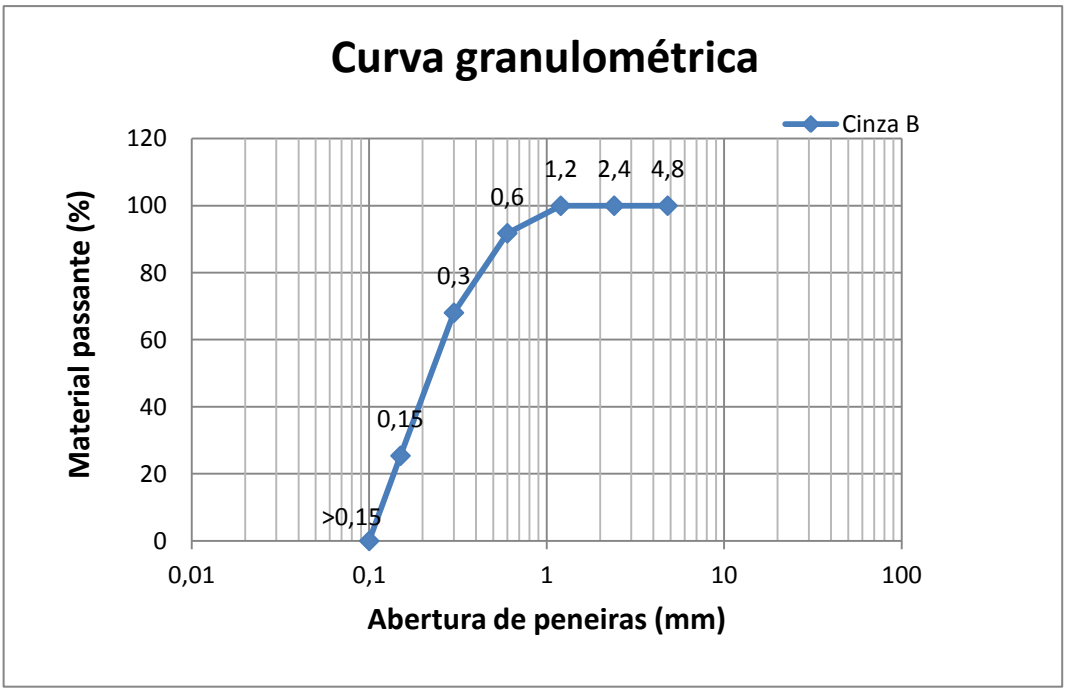


Figura 4.5 – Curva granulométrica da cinza B.

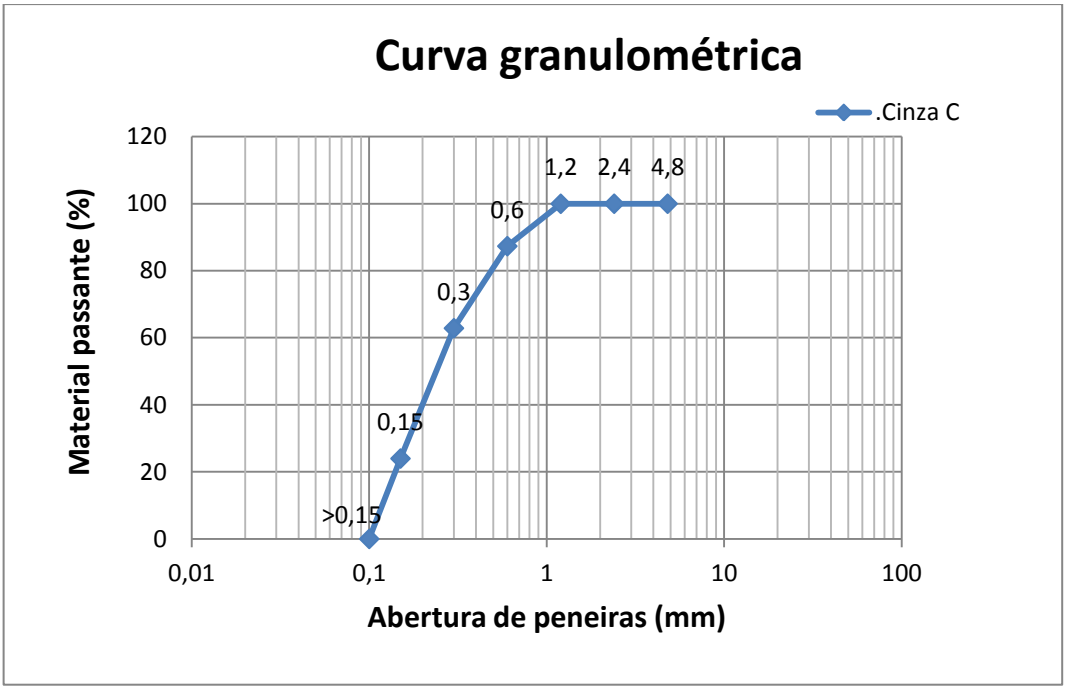


Figura 4.6 – Curva granulométrica da cinza C

Tabela 4.12 - Comparativo do módulo de finuras das variedades de cinzas.

CBC	Cinza A	Cinza B	Cinza C
DIÂMETRO MÁXIMO (mm)	1,20	1,20	1,20
MÓDULO DE FINURA	1,25	1,15	1,26

4.1.4.2 Granulometria a laser

As cinzas foram analisadas ainda com o granulomêtro a laser por apresentarem uma grande quantidade de material fino. Os gráficos da granulometria das cinzas podem ser visualizados nas Figuras 4.7, 4.8 e 4.9 e o comparativo dos diâmetros na Tabela 4.13.

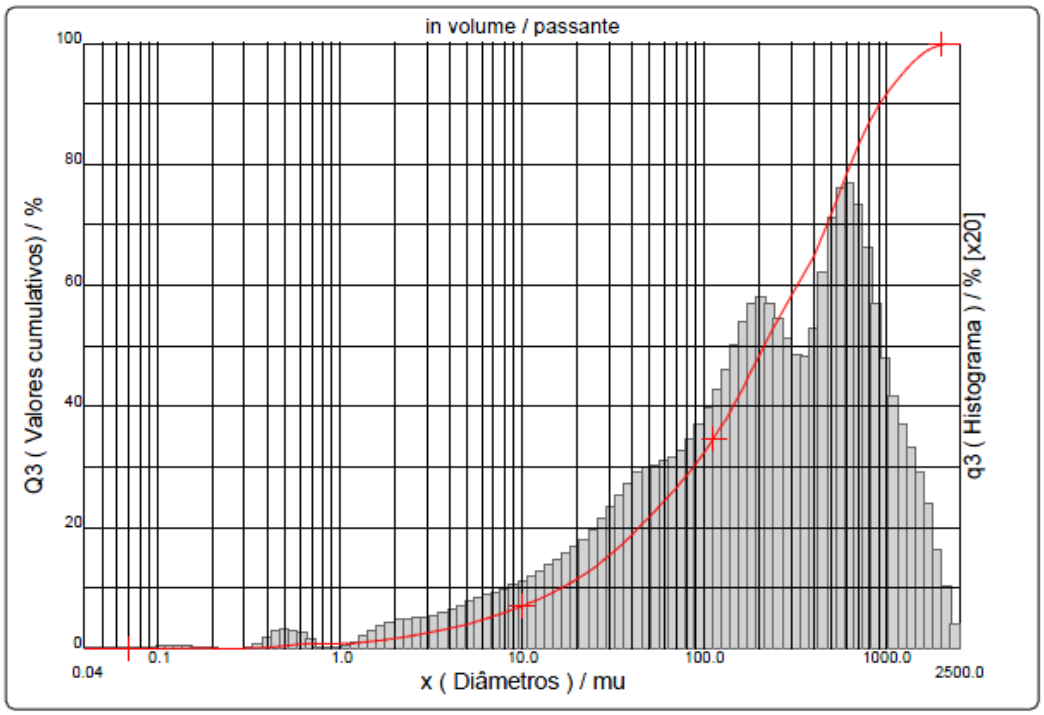


Figura 4.7 - Granulometria a laser da cinza A

Fonte: Cilas 1180 Líquido

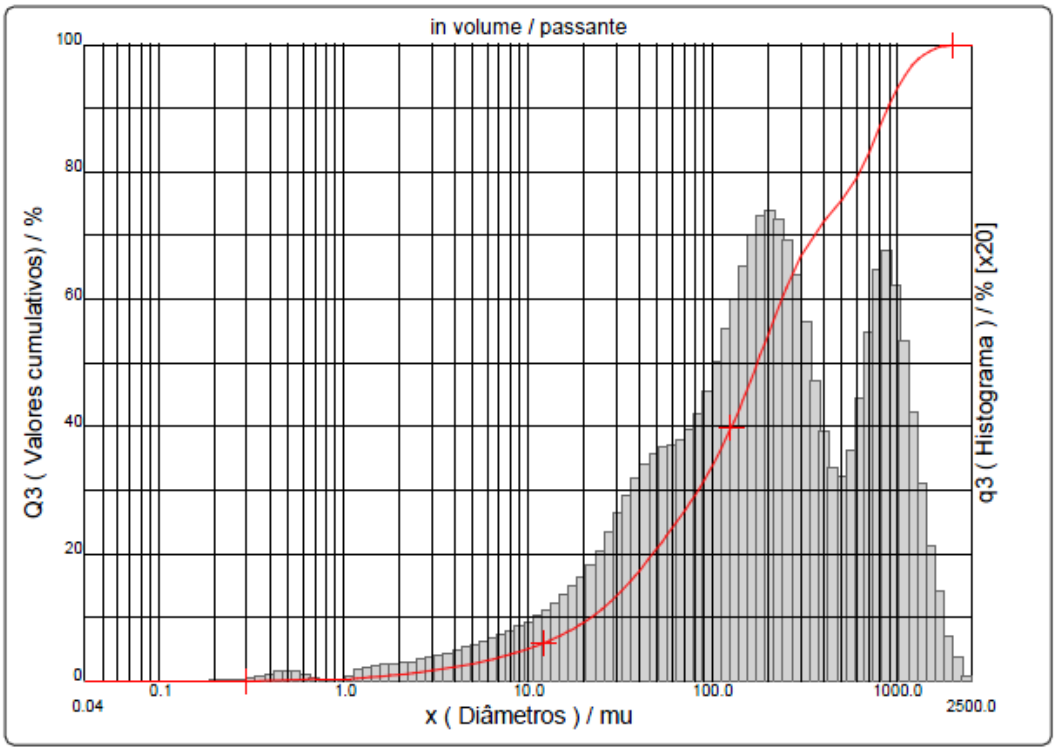


Figura 4.8 - Granulometria a laser da cinza B

Fonte: Cilas 1180 Líquido

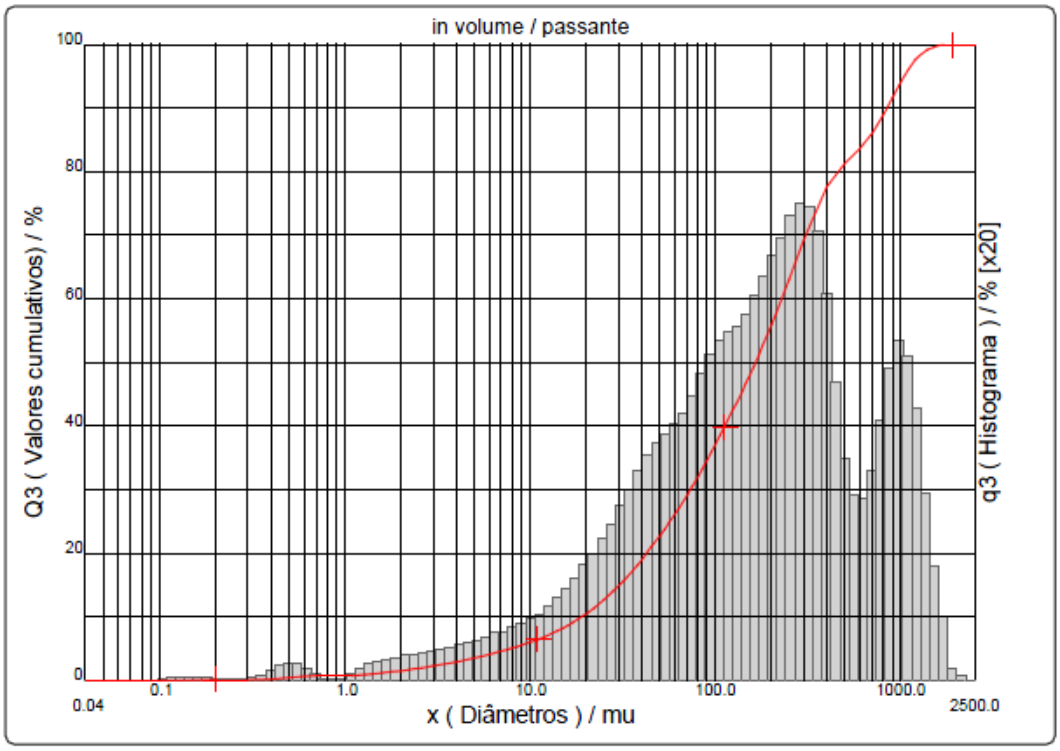


Figura 4.9 - Granulometria a laser da cinza C

Fonte: Cilas 1180 Líquido

Tabela 4.13 – Comparativo da granulometria a laser das cinzas.

Tipo de cinza	**Diâmetro (mμ)**			
	10%	50%	90%	Médio
A	16,20	211,51	914,92	364,04
B	21,79	173,81	881,24	323,62
C	18,84	163,86	838,80	289,38

Pela Tabela 4.13 é possível observar que a cinza A possui um diâmetro médio 13% superior do que a cinza B, e este em torno de 12% em relação a última cinza.

Embora a cinza B, como já antes havia sido averiguado no ensaio de granulometria normal, tenha apresentado granulometria mais fina, o ensaio de granulometria a laser provou que a cinza com o diâmetro médio menor é a C.

Na curva granulométrica notou-se uma certa descontinuidade para todas as variedades de cinza, tal fato pode ter sido resultado da combustão incompleta do bagaço. No entanto, foi possível observar que de uma forma abrangente as cinzas utilizadas nesse trabalho apresentaram granulometrias bastante semelhantes.

4.1.4.3 Massa específica real e massa unitária

Os resultados apresentados na Tabela 4.14 mostram que, embora a cinza B tenha apresentado uma massa específica real um pouco maior que a cinza C, a massa unitária deste último foi menor em relação aos demais, portanto mais leve. A cinza B apresentou uma massa específica real cerca de 5% maior que a cinza A e C e uma Massa unitária 13% maior que a C e 29% maior que a cinza A.

Valores semelhantes da tabela acima foram encontradas por Lima et al (2010) nos seus estudos sobre a CBC.

Tabela 4.14 - Valores médios dos ensaios de massa específica real e massa unitária.

Cinzas	Massa unitária (g/cm³)	Massa específica real (g/cm³)
A	0,75	2,30
B	0,85	2,42
C	0,66	2,33

4.1.4.4 Fluorescência de raios X

De acordo com a Tabela 4.15 nota-se que o SiO_2 é o composto predominante das cinzas, com teores de mais ou menos 50% da massa das amostras, seguido de K_2O com teores na faixa de 20%. Os óxidos Al_2O_3, CaO, MgO, P_2O_5 , SO_3 e Fe_2O_3 representam cerca de 30% da cinza. Ainda foram constatadas impurezas na forma de ZnO, MnO e ZrO_2 com teores inferiores a 1%. Vale salientar que a composição

química da cinza do bagaço pode variar em função do tipo de cana-de-açúcar cultivada, fertilizantes e herbicidas, além de fatores naturais, tais como clima, solo e água.

Tabela 4.15 - Fluorescência de raios X das CBC

Óxidos	Porcentagens (%)		
	Cinza A	Cinza B	Cinza C
SiO_2	48,17	47,57	50,01
K_2O	20,63	20,35	19,38
Al_2O_3	7,85	9,74	8,30
CaO	7,11	5,81	5,92
MgO	7,04	6,73	5,55
P_2O_5	4,10	4,46	2,46
SO_3	3,40	3,12	5,52
Fe_2O_3	1,46	1,48	1,96
MnO	0,14	0,13	0,23
TiO_2	-	0,50	0,58
ZrO_2	0,07	0.07	0.04
ZnO	0.03	0.02	0,05

A predominância da sílica de acordo com Cordeiro (2006) se deve provavelmente ao silício adsorvido do solo pelas raízes da cana-de-açúcar na forma de ácido monossilícico (H_4SiO_4). O mesmo autor acrescenta ainda que também pode ser devido à presença de areia aderida as raízes da cana-de-açúcar que não foram retiradas no processo de limpeza.

O percentual da sílica obtido no ensaio em questão foi bem abaixo dos encontrados na literatura (Borja, 2011 Cordeiro et all., 2010). Tal fato pode ser justificado pelo método da colheita da cana-de-açúcar. Foi consagrado pela literatura que boa parte da sílica encontrada na CBC provém da areia que se mistura com a cana na hora da colheita mecânica. De acordo com as informações obtidas na empresa na qual foram coletadas as amostras, é utilizado o método manual na hora da colheita, o que diminui em cerca de 20% a quantidade da areia misturada à cana.

Foram constatados teores acima da média do óxido de potássio em todas as variedades, tal aumento foi provocado pelo uso de fertilizantes à base de potássio nas plantações que posteriormente é transmitido ao bagaço como foi informado pela empresa Extrema.

Os outros principais óxidos responsáveis pela melhoria das propriedades da cinza, tais como Al_2O_3 e CaO se mostraram dentro da faixa encontrada nas literaturas.

4.1.4.5 Difração de raios X

Os resultados do ensaio de DRX das três variedades de cana foram plotados nas Figuras 4.10, 4.11 e 4.12.

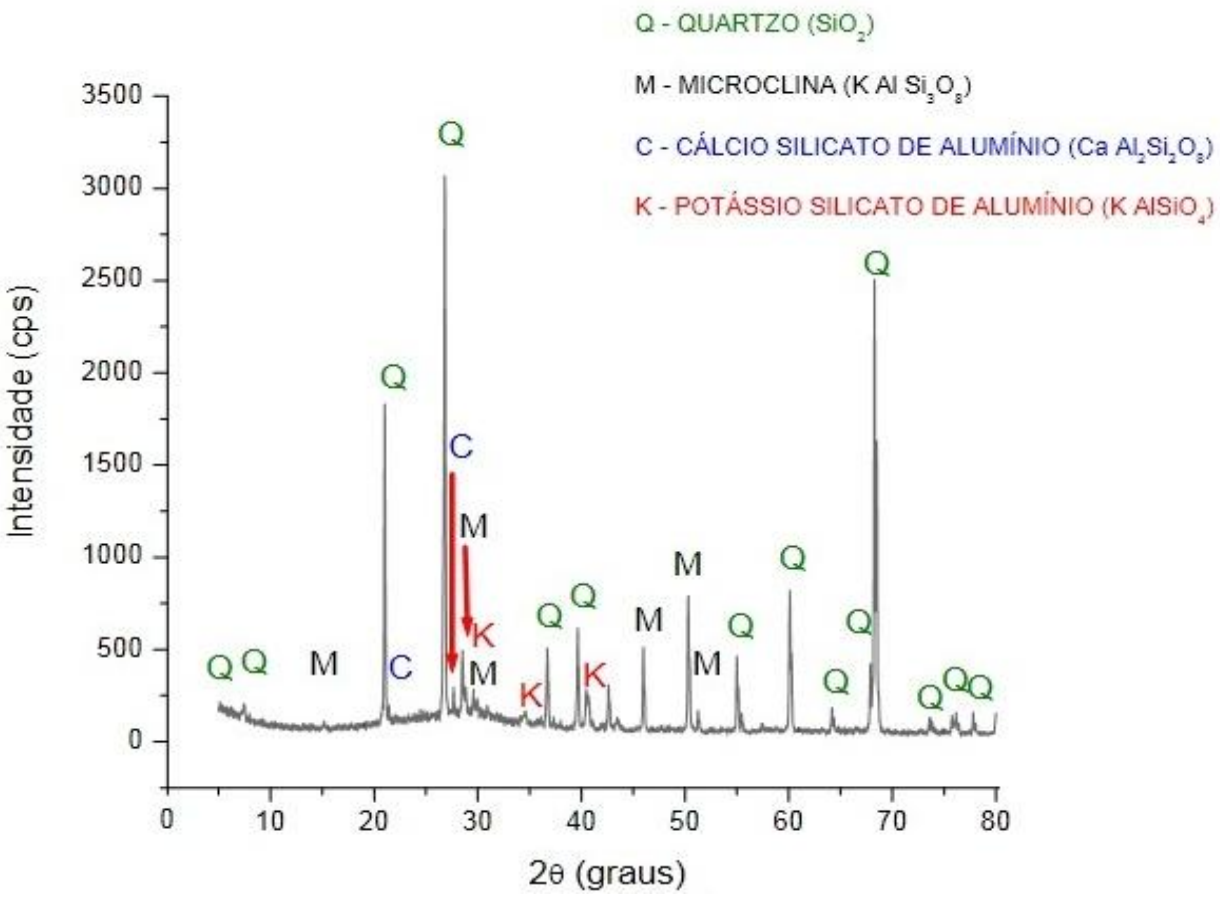


Figura 4.10 - DRX cinza A

Fonte: SHIMADZU XRD-7000

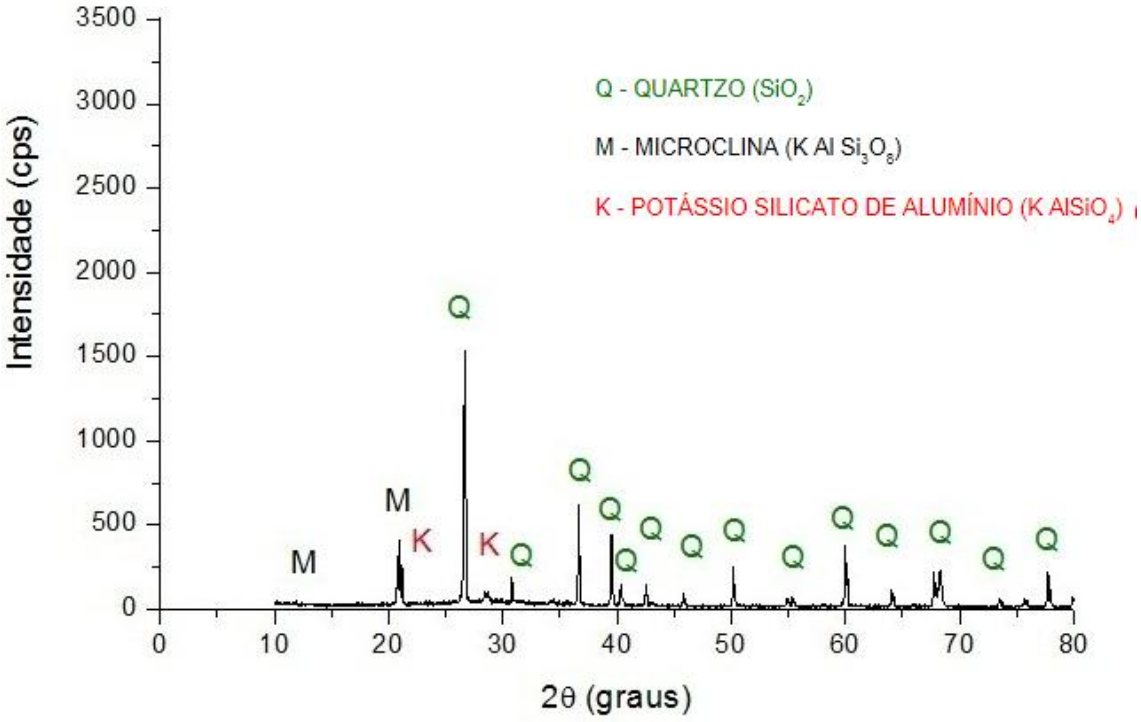


Figura 4.11 - DRX cinza B

Fonte: SHIMADZU XRD-7000

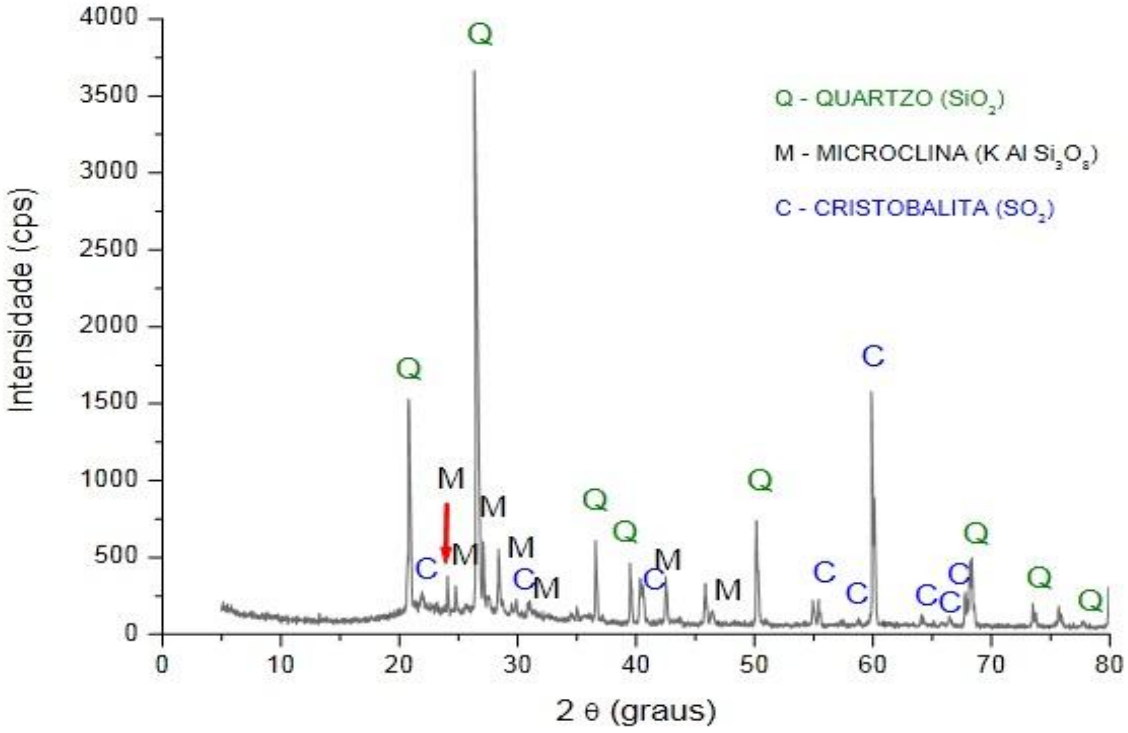


Figura 4.12 - DRX cinza C

Fonte: SHIMADZU XRD-7000

Os resultados da análise química por DRX mostraram, como era esperado, vários picos de sílica na forma de quartzo e na forma de cristobalita, e sílica aluminato de potássio na forma de microclina para todas as variedades de cinza, o que corrobora os resultados obtidos no FRX.

O halo entre 2θ = 06 e 18° caracteriza a fase amorfa das cinzas do bagaço. Contudo, os gráficos obtidos através deste ensaio demonstraram que as cinzas possuíam uma reatividade baixa devido à grande quantidade de picos de cristalinidade encontrados nos gráficos. No entanto, é possível observar que a cinza B apresentou picos de cristalinidade de intensidade baixa se comparado com as outras amostras. Baseado nos resultados do DRX pode-se afirmar que a influência positiva da adição de CBC no concreto nas diferentes idades, pode estar relacionada à sua menor finura em relação à areia.

4.1.4.6 Pozolanicidade

Com intuito de averiguar a reatividade das cinzas em questão, foram realizados ensaios de pozolanicidade com o cimento Portland (NBR 12653/2012) e os resultados estão apresentados na Tabela 4.16 e na Figura 4.13.

Tabela 4.16 – Resistência à compressão das argamassas com as cinzas.

Amostra	Tensão (MPa)	Porcentagem em relação a A.P (%)
AP	32,04	0,00
AA	16,13	50,34
AB	15,15	47,28
AC	13,96	43,57

LEGENDA:
AP – argamassa padrão
AA – argamassa com cinza A
AB – argamassa com cinza B
AC – argamassa com cinza C

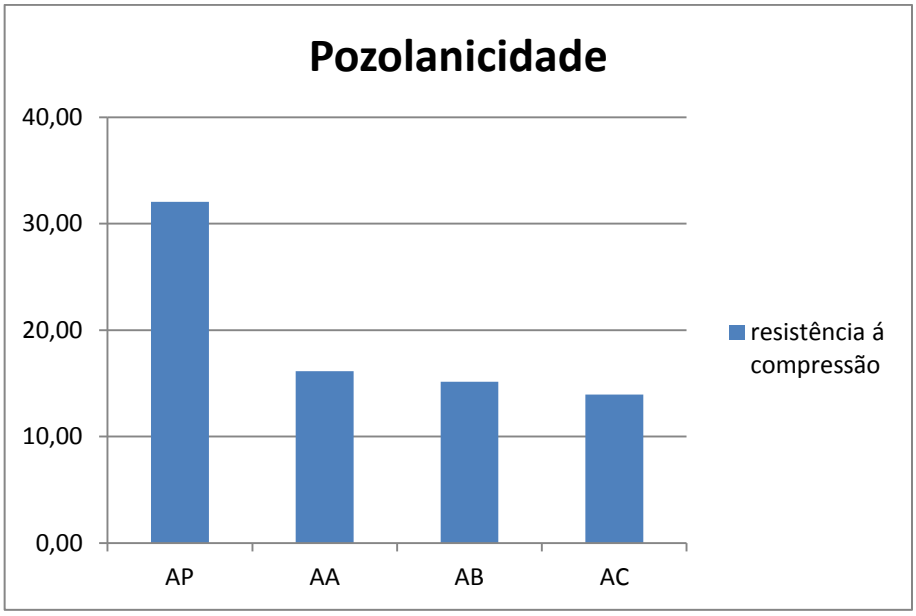


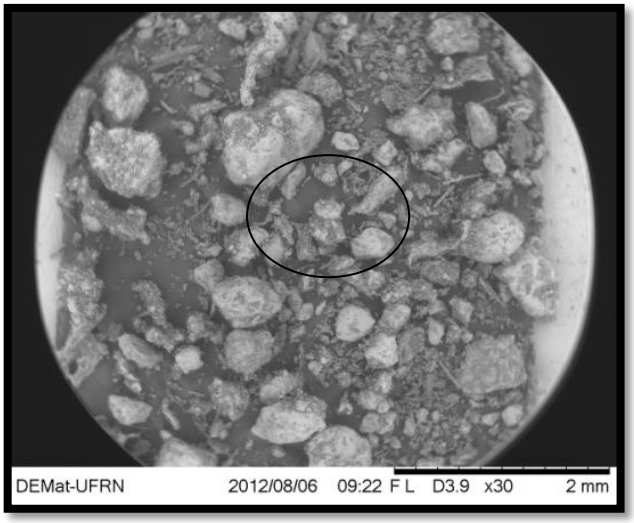
Figura 4.13 – Resistência à compressão das argamassas com as cinzas.

A norma estipula que, para que um material seja considerado pozolânico, a resistência à compressão das argamassas feitas com o material em substituição parcial ao cimento deverá ser no mínimo 75% da resistência da Argamassa Padrão. De acordo com os resultados obtidos às resistências das argamassas A, B e C concluiu-se que as cinzas analisadas nessa dissertação não atendem as exigências da norma de pozolanicidade, já que os valores obtidos não atingiram o limite mínimo que seria de 24,03 MPa.

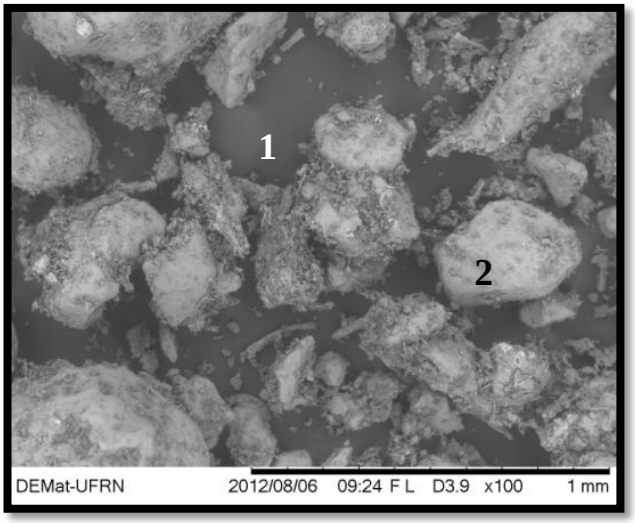
A reduzida atividade pozolânica das cinzas poder ser atribuída a combustão incompleta do bagaço da cana, resultando numa grande quantidade de teor de carbono. Os resultados de DRX demonstraram uma grande quantidade de sílica (SiO_2) cristalina na forma de quartzo, fato esse que tem uma ação direta nos baixos índices de atividade pozolânica encontrados no ensaio previamente citado.

4.1.4.7 Análise microestrutural

As microestruturas das cinzas são apresentadas a seguir mediante imagens do MEV com ampliações de 30 e 100 vezes (Figuras 4.14, 4.15 e 4.16).



(a) Aumento de 30X da amostra de CBC



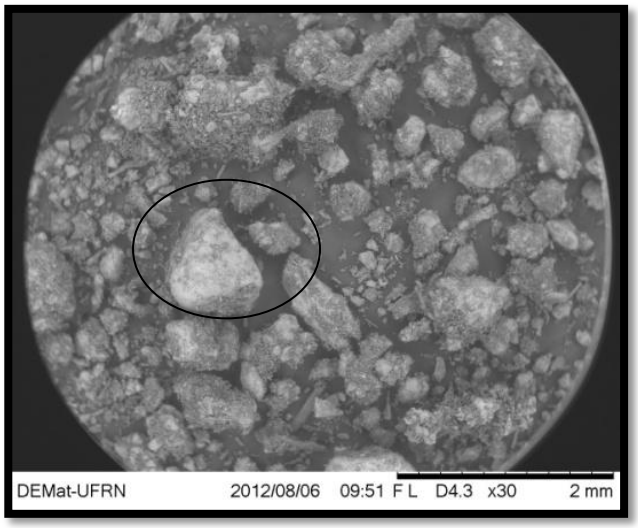
(b) Aumento de 100X do detalhe destacado na imagem (a)

Legenda:

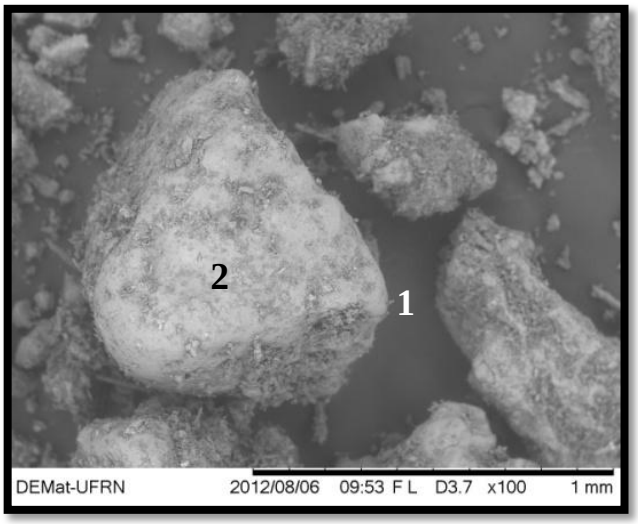
1 – Fita de Carbono

2 – Grãos da Cinza

Figura 4.14 – MEV da cinza A



(a) Aumento de 30X da amostra de CBC



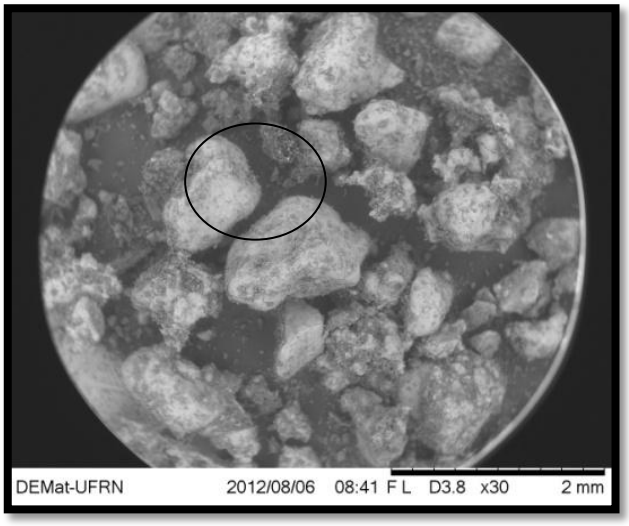
(b) Aumento de 100X do detalhe destacado na imagem (a)

Legenda:

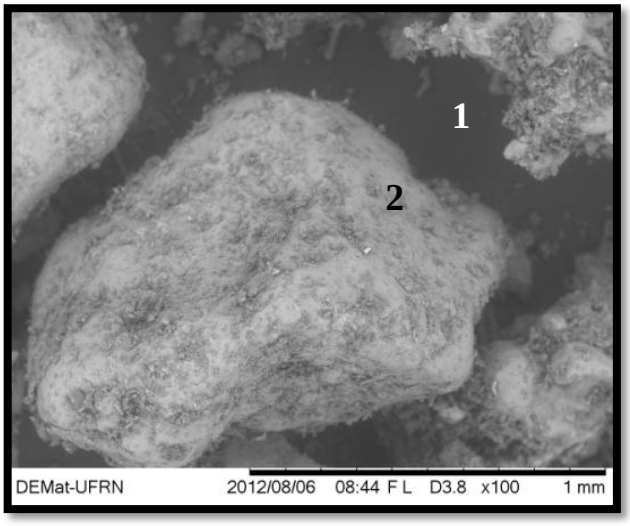
1 – Fita de Carbono

2 - Grãos da Cinza

Figura 4.15 – MEV da cinza B



(a) Aumento de 30X da amostra de CBC



(b) Aumento de 100X do detalhe destacado na imagem (a)

Legenda:
1 – Fita de Carbono
2 - Grãos da Cinza

Figura 4.16 – MEV da cinza C

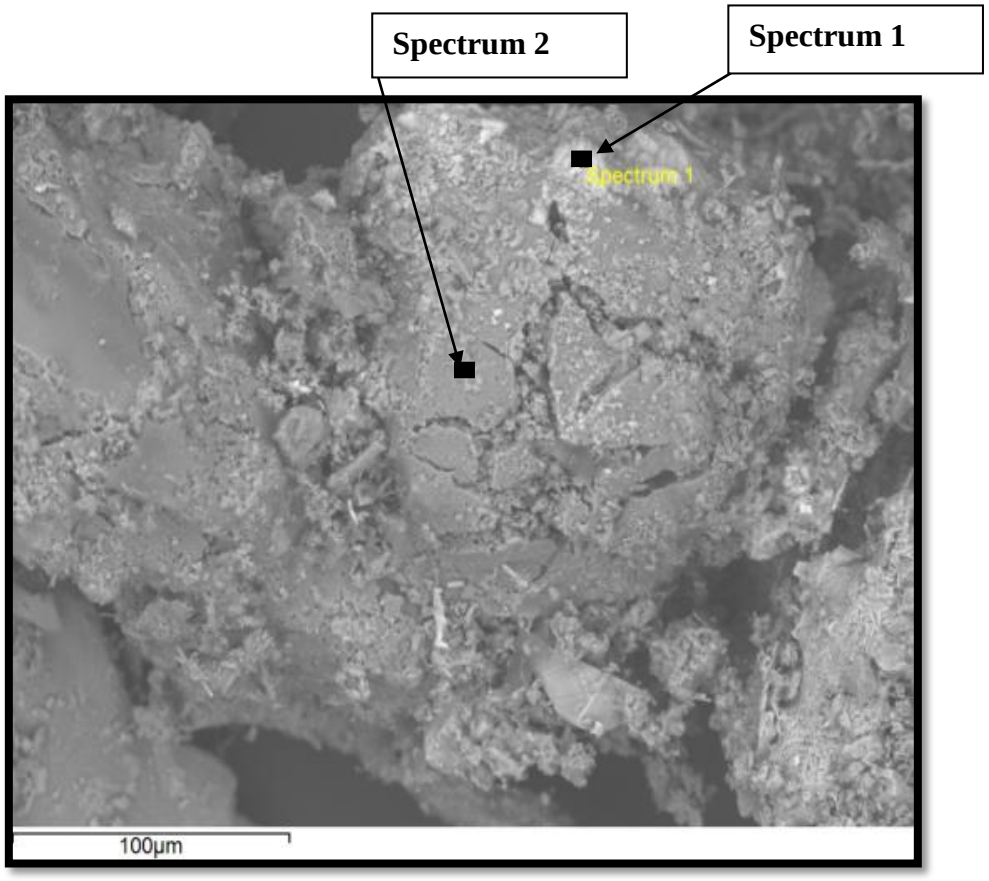
Pelas imagens é possível observar que a cinza é constituída tanto por grãos de grande tamanho, como também de partículas bem pequenas, o que corrobora os resultados obtidos no ensaio de granulometria.

Analisando as Figuras 4.14, 4.15 e 4.16, é possível observar ainda que a cinza B possui partículas com formato mais arredondados se comparada com as demais cinzas, que apresentam formato mais lamelar. Fato esse, que pode vir a ter uma influência na consistência dos concretos resultante da absorção de água de amassamento. Diante da morfologia apresentada pelas partículas de cinzas, pode-se considerar que a cinza B poderá vir a intervir de forma menos severa na diminuição da consistência e, consequentemente da trabalhabilidade.

Com intuito de analisar pontualmente os elementos presentes nas cinzas, foram feitas análises pontuais por EDS em dois lugares com características distintas para cada tipo de cinza. As imagens e os resultados obtidos para a cinza A estão apresentados nas Figuras 4.17, 4.18 e 4.19 e Tabelas 4.17 e 4.18. A análise pontual do primeiro ponto (Spectrum 1)

revelou 43,4 % de sílica e 45,8% de potássio o que confirma também a grande quantidade de potássio obtido no ensaio de FRX.

No segundo ponto (Spectrum 2) foi selecionado um local que apresentou 85,76% de potássio, mas também permitiu observar os outros elementos em quantidades relativamente baixas.



Aumento de 500X

Figura 4.17 Pontos escolhidos (Spectrum 1 e 2) na imagem de MEV da cinza A para análise de EDS.

Tabela 4.17 – Elementos detectados no Spectrum 1 da Cinza A.

Elemento	Peso %	Peso% σ	Atômico %
Magnésio	4,06	0,18	5,44
Alumínio	1,78	0,16	2,15
Sílica	43,40	0,49	50,39
Potássio	45,81	0,51	38,20
Cálcio	4,07	0,37	3,31
Ferro	0,88	0,50	0,51

Fonte: A-STREAM SWIFTED3000

Tabela 4.18 – Elementos detectados no Spectrum 2 da Cinza A.

Elemento	Peso %	Peso% σ	Atômico %
Magnésio	1,71	0,18	2,61
Alumínio	2,26	0,18	3,12
Sílica	8,05	0,24	10,66
Potássio	85,80	0,60	81,64
Cálcio	1,94	0,37	1,80
Ferro	0,25	0,45	0,17

Fonte: A-STREAM SWIFTED3000

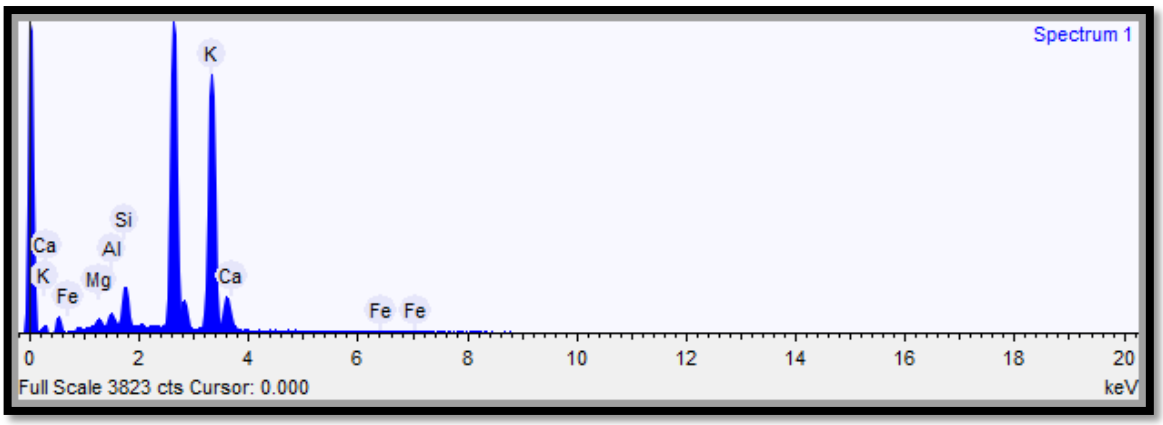


Figura 4.18 – Spectrum 1 EDS da Cinza A

Fonte: A-STREAM SWIFTED3000

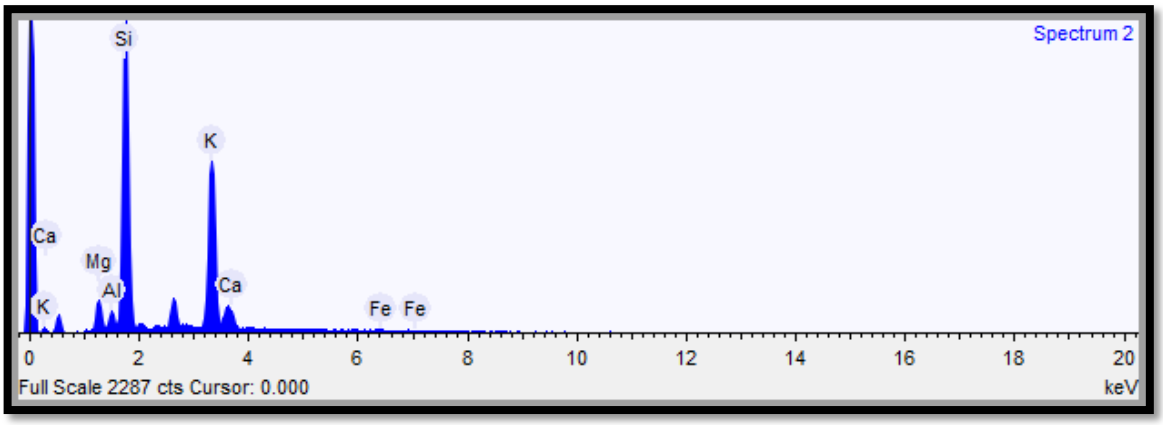
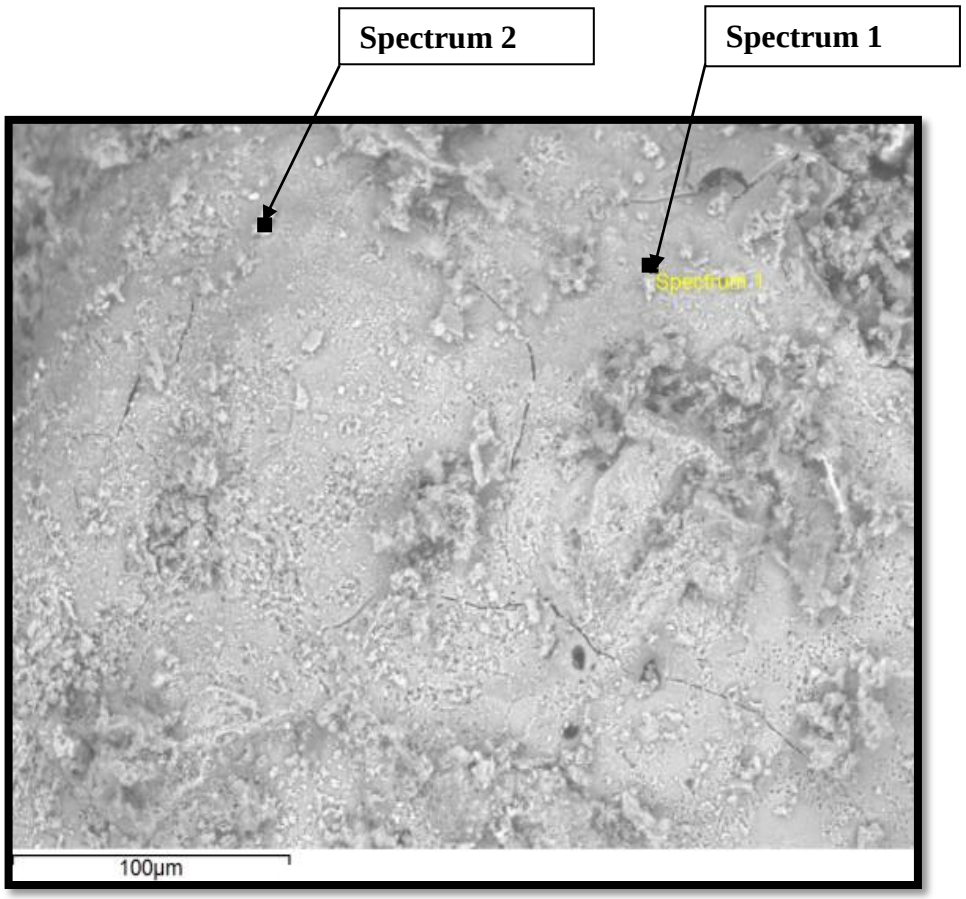


Figura 4.19 – Spectrum 2 EDS da Cinza A

Fonte: A-STREAM SWIFTED3000

Os resultados da análise de EDS demonstraram para a cinza B, tanto no primeiro (Spectrum 1) ponto como no segundo (Spectrum 2), um teor de cálcio bem maior se comparado com os resultados obtidos na cinza A. Mas, no entanto o magnésio, o alumínio, a sílica e o potássio deram valores bastante próximos ao já encontrados na cinza A para ambos os pontos. As imagens do MEV e Análises de EDS da cinza B podem ser vistos nas Figuras 4.20, 4.21 e 4.22, e Tabelas 4.19 e 4.20 a seguir.



Aumento de 500X

Figura 4.20 - Pontos escolhidos (Spectrum 1 e 2) na imagem de MEV da cinza B para análise de EDS.

Tabela 4.19 – Elementos detectados no Spectrum 1 da Cinza B.

Elemento	Peso %	Peso% σ	Atômico %
Magnésio	5,05	0,18	7,23
Alumínio	2,74	0,16	3,53
Sílica	23,42	0,32	29,02
Potássio	43,72	0,43	38,91
Cálcio	23,18	0,40	20,13
Ferro	1,89	0,38	1,18

Fonte: A-STREAM SWIFTED3000

Tabela 4.20 – Elementos detectados no Spectrum 2 da Cinza B.

Elemento	Peso %	Peso% σ	Atômico %
Magnésio	8,39	0,17	11,24
Alumínio	2,27	0,14	2,75
Sílica	37,15	0,29	43,11
Potássio	33,75	0,30	28,13
Cálcio	17,51	0,28	14,24
Ferro	0,92	0,25	0,54

Fonte: A-STREAM SWIFTED3000

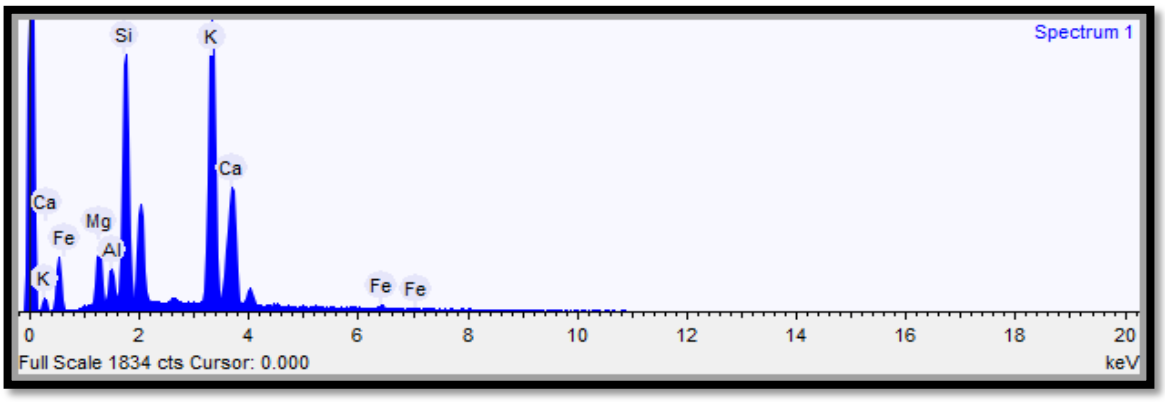


Figura 4.21 – Spectrum 1 EDS da Cinza B

Fonte: A-STREAM SWIFTED3000

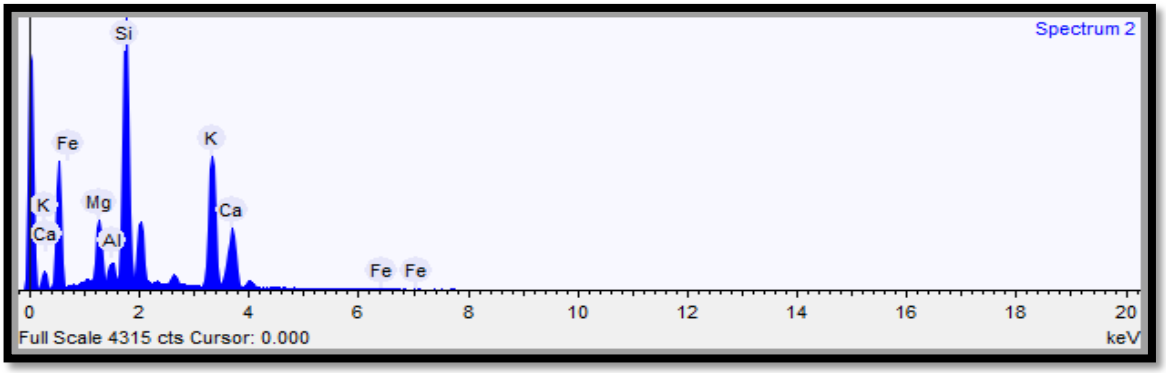
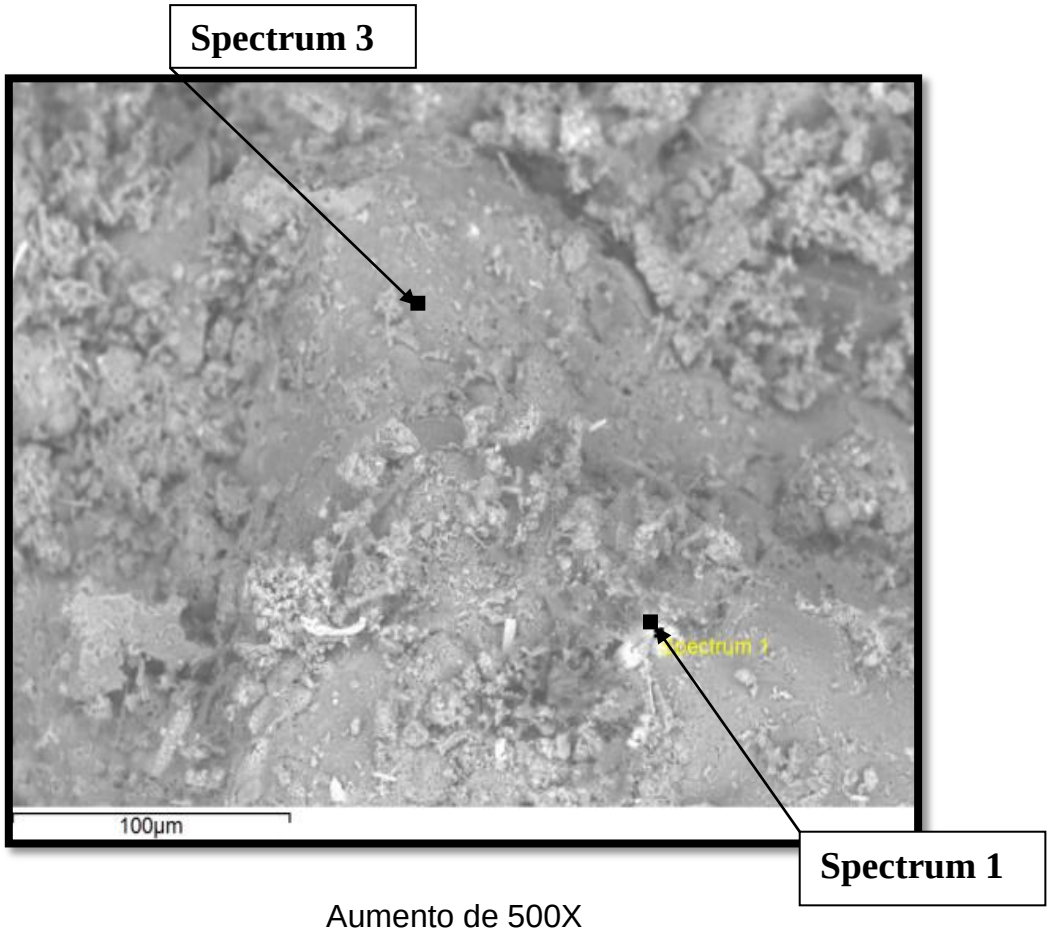


Figura 4.22 – Spectrum 2 EDS da Cinza B

Fonte: A-STREAM SWIFTED3000

Para a cinza “C” obteve-se porcentagens muito altas de sílica e potássio se comparadas às outras cinzas, embora de forma invertida nos dois pontos. Enquanto que no primeiro ponto se constatou apenas 12,74% de sílica, no segundo ponto esse percentual subiu para 79,95%. O mesmo fenômeno aconteceu para o potássio, só que em ordem inversa. No primeiro ponto foi encontrado 78,67%, no segundo caiu para 9,58%. Na mesma análise ainda foram constados no segundo ponto outros elementos nomeadamente Cobalto e Tungstênio, mas, contudo o porcentual destes elementos ficou baixo, variando até 5% no máximo (ver Figuras 4.23, 4.24 e 4.25 e Tabelas 4.21 e 4.22).



Aumento de 500X

Figura 4.23 Pontos escolhidos (Spectrum 1 e 3) na imagem de MEV da cinza C para análise de EDS.

Tabela 4.21 – Elementos detectados no Spectrum 1 da Cinza C.

Elemento	Peso %	Peso% σ	Atômico %
Magnésio	2,52	0,16	3,82
Alumínio	2,70	0,17	3,70
Sílica	12,74	0,30	16,75
Potássio	78,67	0,87	74,29
Ferro	1,22	0,42	0,81
Cobalto	0,50	0,48	0,31
Tungstênio	1,67	0,79	0,34

Fonte: A-STREAM SWIFTED3000

Tabela 4.22 – Elementos detectados no Spectrum 3 da Cinza C.

Elemento	Peso %	Peso % σ	Atômico %
Magnésio	1,094	0,103	1,317
Alumínio	5,443	0,164	5,904
Sílica	79,955	0,454	83,325
Potássio	9,575	0,266	7,168
Cálcio	1,091	0,199	0,797
Ferro	2,842	0,371	1,489

Fonte: A-STREAM SWIFTED3000

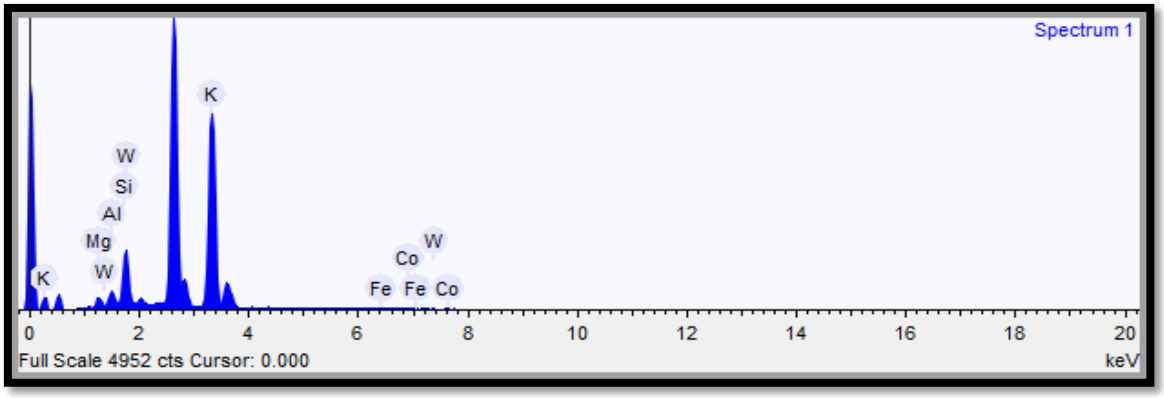


Figura 4.24 – Spectrum 1 EDS da Cinza C

Fonte: A-STREAM SWIFTED3000

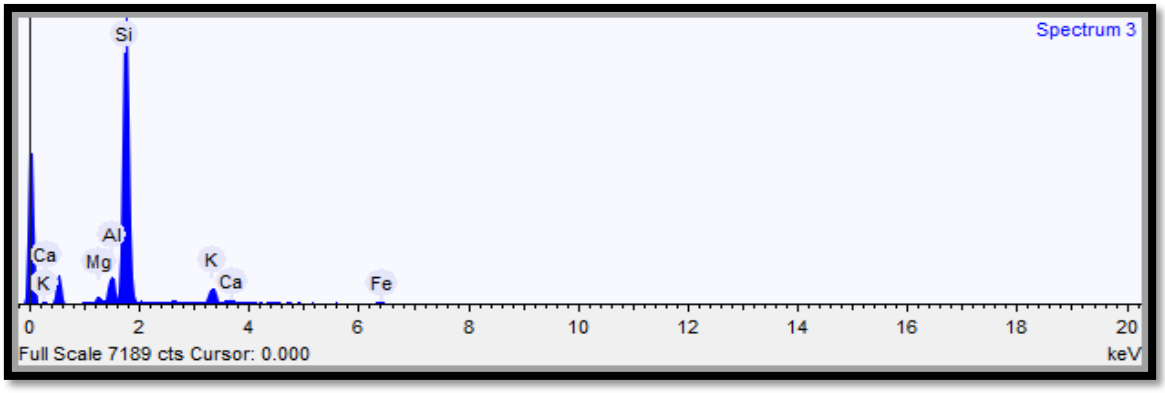


Figura 4.25 – Spectrum 3 EDS da Cinza C

Fonte: A-STREAM SWIFTED3000

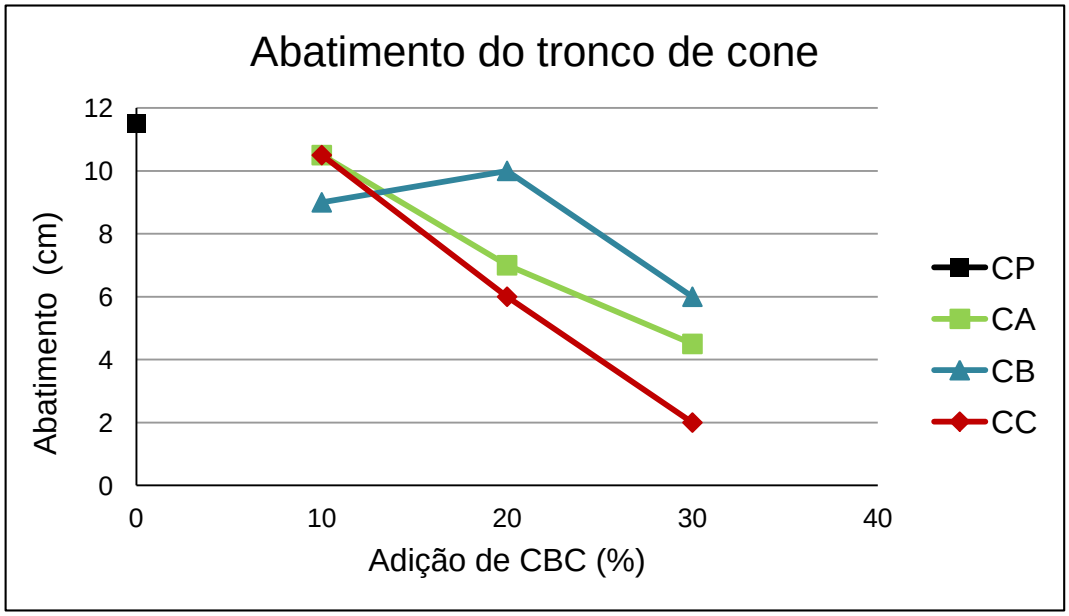
De forma geral, constatou-se que as cinzas apresentavam pouca diferença em nível microscópico entre as variedades estudadas. No entanto, foi possível

observar em todas as cinzas a presença de matéria orgânica, resultante da queima ineficiente. Os resultados apresentados corroboraram a presença dos elementos já mencionados nos ensaios de FRX e DRX.

4.1.5 Concreto

4.1.5.1 Ensaio de consistência

As alterações no comportamento plástico do concreto estão apresentadas na Figura 4.26.



LEGENDA:

CP – concreto padrão

CA – concreto com cinza A

CB – concreto com cinza B

CC – concreto com cinza C

Figura 4.26 – Ensaio de consistência dos concretos

Pela Figura conclui-se que houve uma queda significativa na trabalhabilidade do concreto com o aumento dos teores de cinza, chegando-se a conclusão que a incorporação das CBC influenciou na plasticidade dos concretos.

O concreto CA apresentou um comportamento inesperado com 20% de adição de CBC, o qual teve um ligeiro aumento. Contudo, essa trabalhabilidade voltou a diminuir com o aumento do teor de CBC chegando a ser 55,5% menor que o apresentado pelo concreto padrão.

Tanto o concreto CB como o CC mostraram uma redução de quase 10% de trabalhabilidade em relação ao concreto padrão com a adição de 10% de CBC. Contudo, com o aumento dos teores de CBC, o concreto CC perdeu mais trabalhabilidade e aos 30% de incorporação foi 475% menor do que o concreto padrão, enquanto que o CB foi 155% menor.

A queda brusca na trabalhabilidade é justificável pela combustão incompleta das cinzas, provocada pelos teores altos de matéria orgânica. A queima em temperaturas não controladas faz com que a CBC absorva mais água necessária para a manutenção da consistência do concreto, deixando este mais seco e por consequência menos trabalhável.

A morfologia das partículas de cinza (visualizadas no MEV) podem também ter contribuído na alteração da consistência, como foi suposto anteriormente. O fato da cinza B apresentar menor redução na consistência corrobora a hipótese de que o formato do grão interfere de forma considerável na trabalhabilidade do concreto.

4.1.5.2 Ensaio de absorção, índice de vazios e porosidade total

Os resultados constatados nos ensaios de Absorção, índice de vazios e Porosidade total são apresentados a seguir nas Figuras 4.27, 4.28 e 4.29.

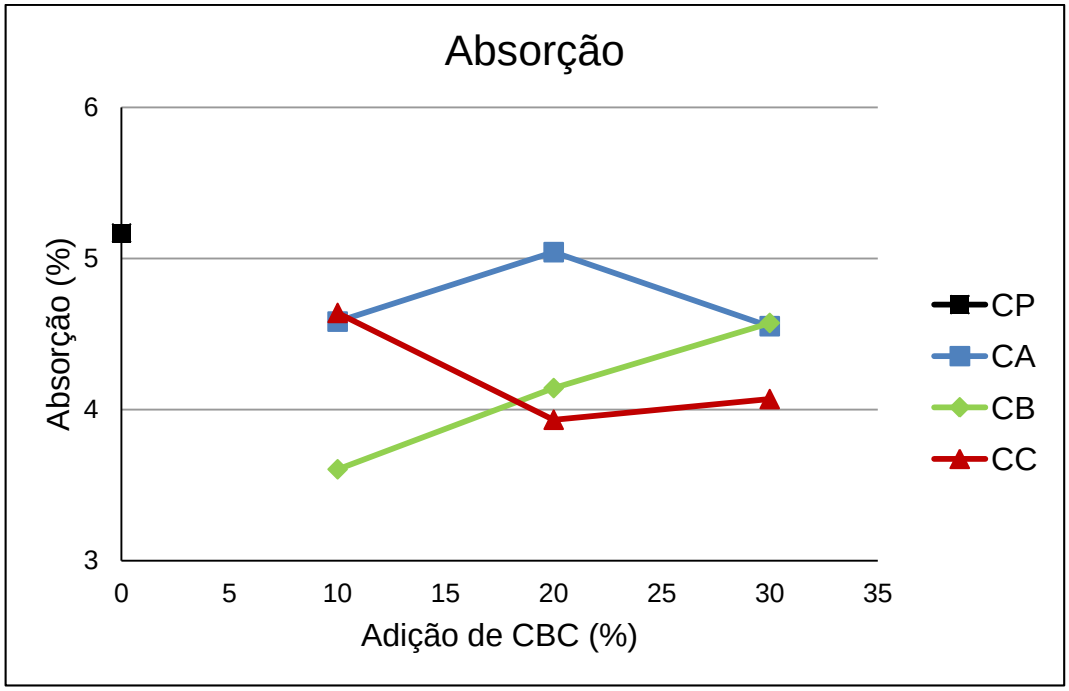


Figura 4.27 Variação da absorção aos 28 dias com aumento dos teores de CBC.

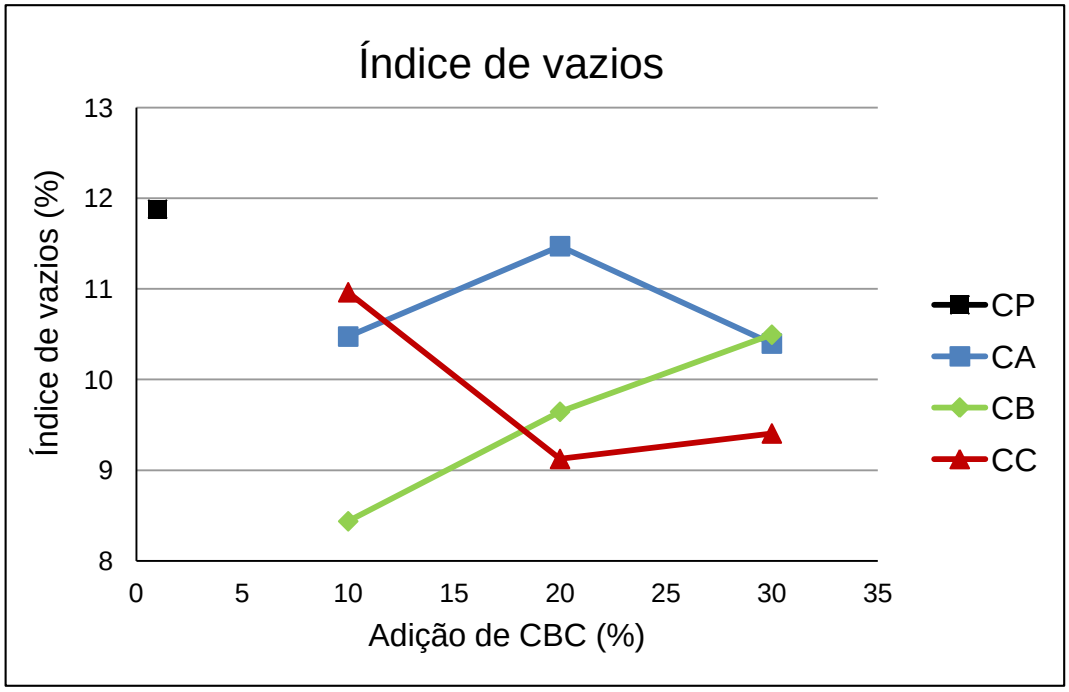


Figura 4.28 Variação do índice de vazios aos 28 dias com aumento dos teores de CBC.

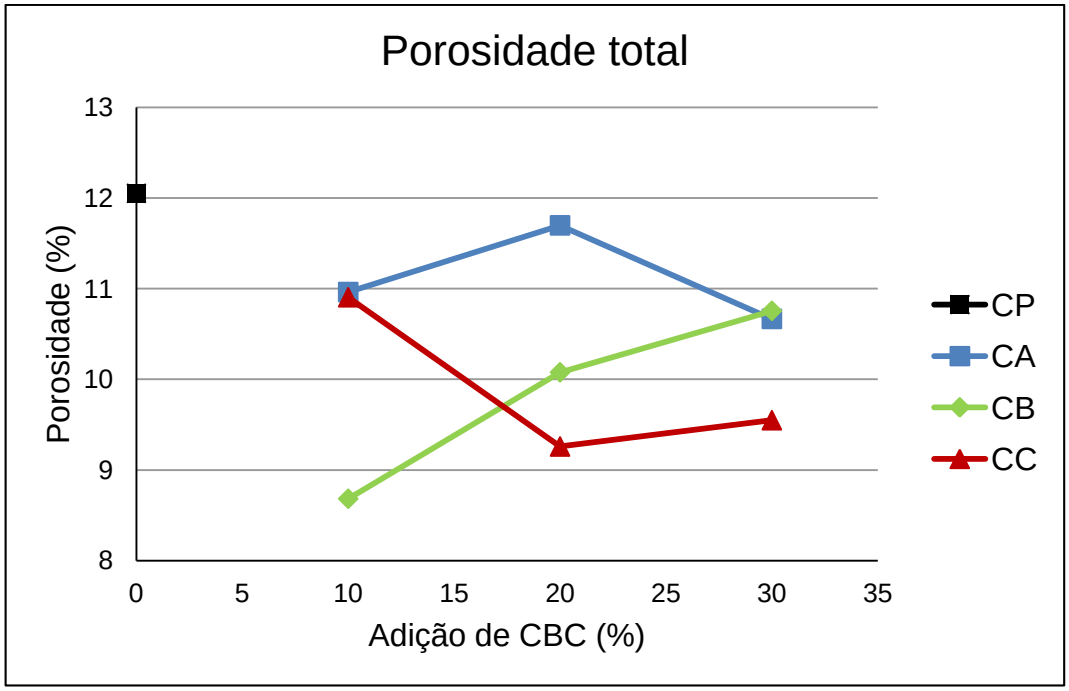


Figura 4.29 - Variação da porosidade total aos 28 dias com aumento dos teores de CBC.

Os resultados demonstraram uma redução no índice de vazios, na absorção e na porosidade total em relação ao concreto padrão para todos os teores de adição das cinzas.

O concreto CA com 10% de CBC apresentou uma diminuição de 13% no índice de vazios em relação ao concreto padrão. Mas com 20% de adição de cinza, houve um ligeiro aumento no índice de vazios que foi seguido de uma queda, voltando ao valor inicial após 30% de incorporação de CBC.

Já o concreto CB teve uma redução maior na absorção com a incorporação de 10% da CBC chegando à marca dos 43% menor se comparado com o concreto padrão. No entanto essa diferença foi reduzindo com o aumento dos teores de CBC, fechando com 13% de diferença.

O valor da porosidade do concreto CC foi diminuído com a incorporação da cinza, iniciando com quase 11% menor que o concreto padrão ao adicionar 10% de cinza e fechando com 26% menor do que o concreto padrão ao adicionar 30% de cinza.

Comportamentos similares foram constatados nos outros gráficos acima expostos como era de se esperar. A grande redução da porosidade, absorção e índice de vazios resultando num aumento de compacidade para todos os concretos contendo CBC pode ser explicada pela morfologia das partículas de cinza e também pelo efeito fíller.

4.1.5.3 Ensaio da Massa específica real

O gráfico (Figura 4.30) a seguir expõe o comportamento apresentado pelas CBC no ensaio de massa específica real.

De acordo com os gráficos acima apresentados, a adição da CBC provocou uma variação quase insignificante em termos de massa especifica real do concreto.

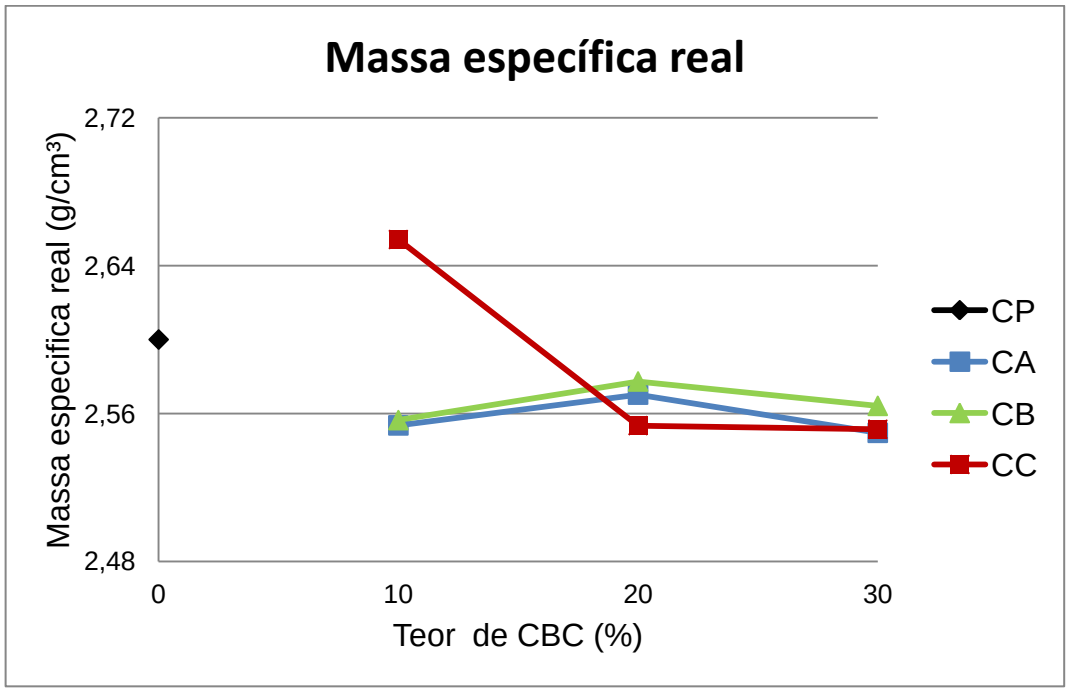


Figura 4.30 - Variação da massa específica real com o aumento dos teores das CBC.

4.1.5.4 Ensaio da Resistência à compressão

Esse subitem retrata os resultados do concreto no estado endurecido. Dessa forma, os corpos-de-prova referentes ao ensaio de resistência à compressão foram rompidos aos 7, 28 e 91 dias e os resultados estão apresentados nas Figuras 4.31 4.32 e 4.33.

O concreto CA10% demonstrou uma queda na resistência aos 7 dias de 12% em relação ao concreto padrão. No entanto, com o passar do tempo constatou-se uma melhoria na resistência chegando a ultrapassar o concreto padrão em quase 3% aos 91 dias.

O concreto CB10% apresentou melhor resistência aos 28 dias em relação aos demais com 39,19 Mpa e exibiu na idade de 7 dias, uma resistência superior ao do concreto padrão com uma margem de quase 5%, diferença tal que foi aumentando com o tempo, chegando a quase 9% aos 91 dias.

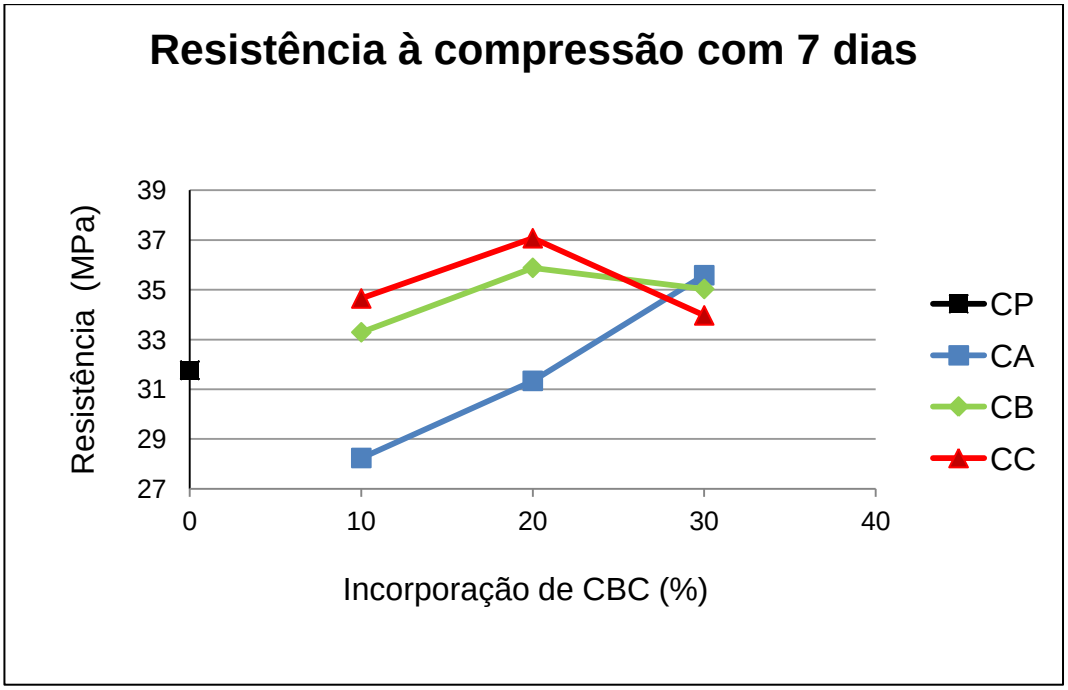


Figura 4.31 Resistência à compressão dos concretos aos 7 dias com a incorporação de 10, 20 e 30% de variedades de CBC

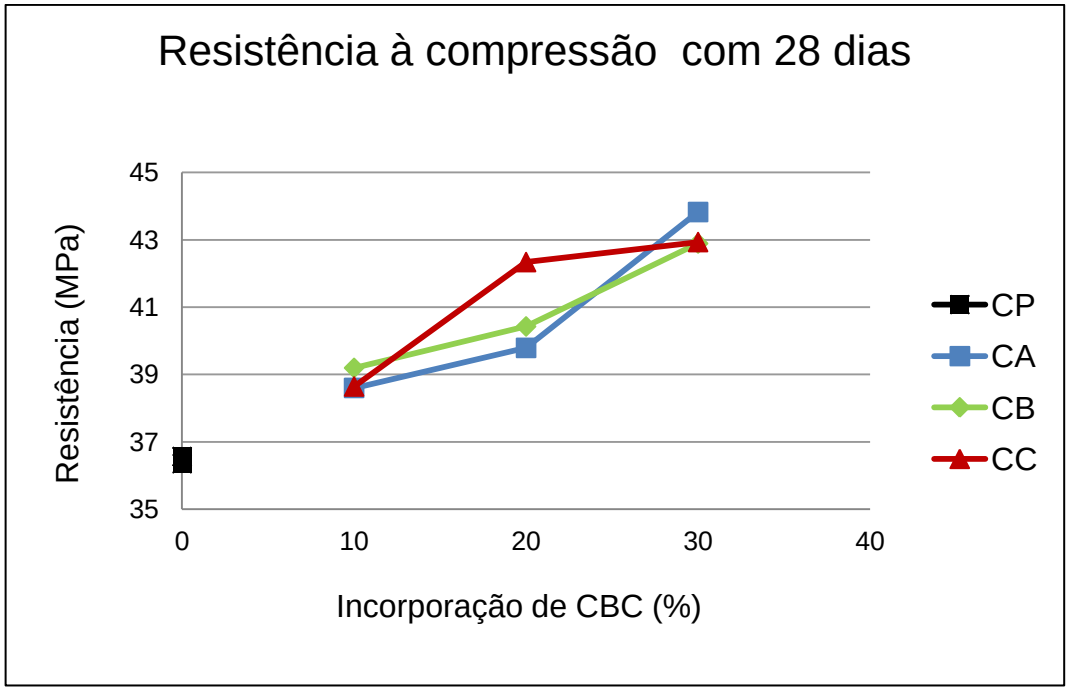


Figura 4.32 Resistência à compressão dos concretos aos 28 dias com a incorporação de 10, 20 e 30% de variedades de CBC

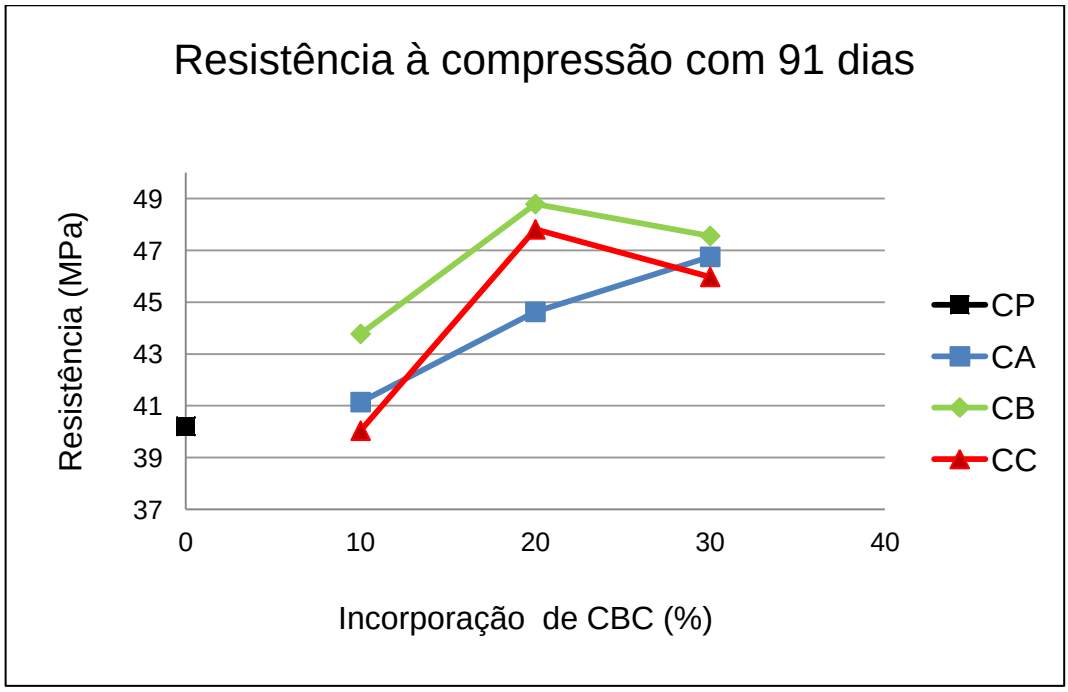


Figura 4.33 Resistência à compressão dos concretos aos 91 dias com a incorporação de 10, 20 e 30% de variedades de CBC

De todos os concretos com adição 10% de CBC o que mais apresentou melhoria significativa de resistência aos 7 dias foi o CC10% com 9% a mais que o concreto padrão e 4% maior que o CB10%.

Os resultados apresentados nas Figuras 4.31 e 4.32 mostraram que quase todos os concretos com adição de 20% de CBC apresentaram um incremento maior na resistência à compressão desde os 7 dias até aos 28 dias.

O concreto CA20% apresentou uma melhoria na resistência aos 7 dias, no entanto, ainda permaneceu abaixo da resistência do concreto padrão com cerca de 1%. Contudo, aos 28 e 91 dias houve um incremento significativo nessa resistência, ultrapassando o concreto padrão em mais de 9%.

O atraso no aumento da resistência do concreto CA pode ser atribuído a reação de hidratação um pouco lenta dos componentes do cimento Portland com a cinza A.

O CB20% na idade de 7 dias, apresentou uma resistência 13% superior ao do concreto padrão e essa diferença subiu para 18% aos 91 dias. Dos concretos estudados, o com 20% de incorporação de cinza apresentou melhor desempenho aos 91 dias.

No entanto, nas idades de 7 e 28 dias, o concreto CC20% apresentou melhor resistência à compressão de todos os concretos com 20% de cinza. Com 7 dias, este ultrapassou o concreto padrão com uma diferença de quase 17%, contudo esse incremento diminuiu com o passar do tempo e se estabilizou com 16% aos 28 e 91 dias.

Os concretos com 30% de CBC mostraram um desempenho em termos de resistência à compressão de no mínimo 10% melhor que o concreto padrão aos 7 dias e quase 17% maior aos 28 e 91 dias.

O CA30% mostrou-se melhor que o concreto padrão aos 7 dias, com uma diferença de 12%, chegando a atingir quase 20% aos 28 dias. No entanto, houve uma queda nessa diferença para 14% aos 91 dias.

Embora o concreto CB30% tenha apresentado melhor resistência que o CC30% aos 7 dias, os resultados mostraram que os dois concretos tiveram valores semelhantes de resistência à compressão aos 28 dias. Entretanto, aos 91 dias a

resistência do CB30% foi quase 4% maior que o CC30% e 16% maior que o concreto padrão.

Pelas Figuras 4.31, 4.32 e 4.33 é possível averiguar ainda que até 20% de adição, as resistências dos concretos contendo CBC foram aumentando assim que os teores das adições foram crescendo.

Os resultados da Figura 4.34 mostraram que praticamente todos os concretos com adição de cinza ultrapassaram a resistência do concreto padrão com 7 dias, com exceção do CA10% e CA20%, os quais apresentaram uma resistência um pouco abaixo do CP. Esse resultado pode ser explicado considerando a hidratação lenta dos constituintes da cinza com o cimento. No entanto, observou-se uma melhoria nessas resistências com o aumento das idades, ultrapassando assim os valores obtidos do concreto padrão aos 28 dias (36,56 MPa) com mais de 5% (38,6 MPa e 39,79 MPa, respectivamente).

O concreto CA30%, embora não tenha apresentado um grande aumento de resistência aos 7 dias, apresentou aos 28 dias um melhor desempenho em relação aos demais, atingindo uma resistência à compressão de 43,82 MPa, quase 20% maior que o concreto padrão (CP).

O concreto que apresentou melhor resistência à compressão aos 91 dias foi o CB20% com 48,79 MPa, quase 17% a mais que o concreto padrão.

O concreto CC20% mostrou-se bastante eficiente no aumento da resistência na idade de 7 dias, atingindo uma resistência de 37,07 MPa, o que corresponde a quase 17% a mais do que o concreto padrão, que alcançou aos 7 dias a resistência de 31,76 MPa.

Aos 28 dias, observou-se que todos os concretos com resíduos do bagaço da cana-de-açúcar, mostraram-se bem mais eficientes em termos de resistência se comparados com o concreto padrão, com uma vantagem no mínimo de 5%, chegando a atingir um valor máximo de 20%.

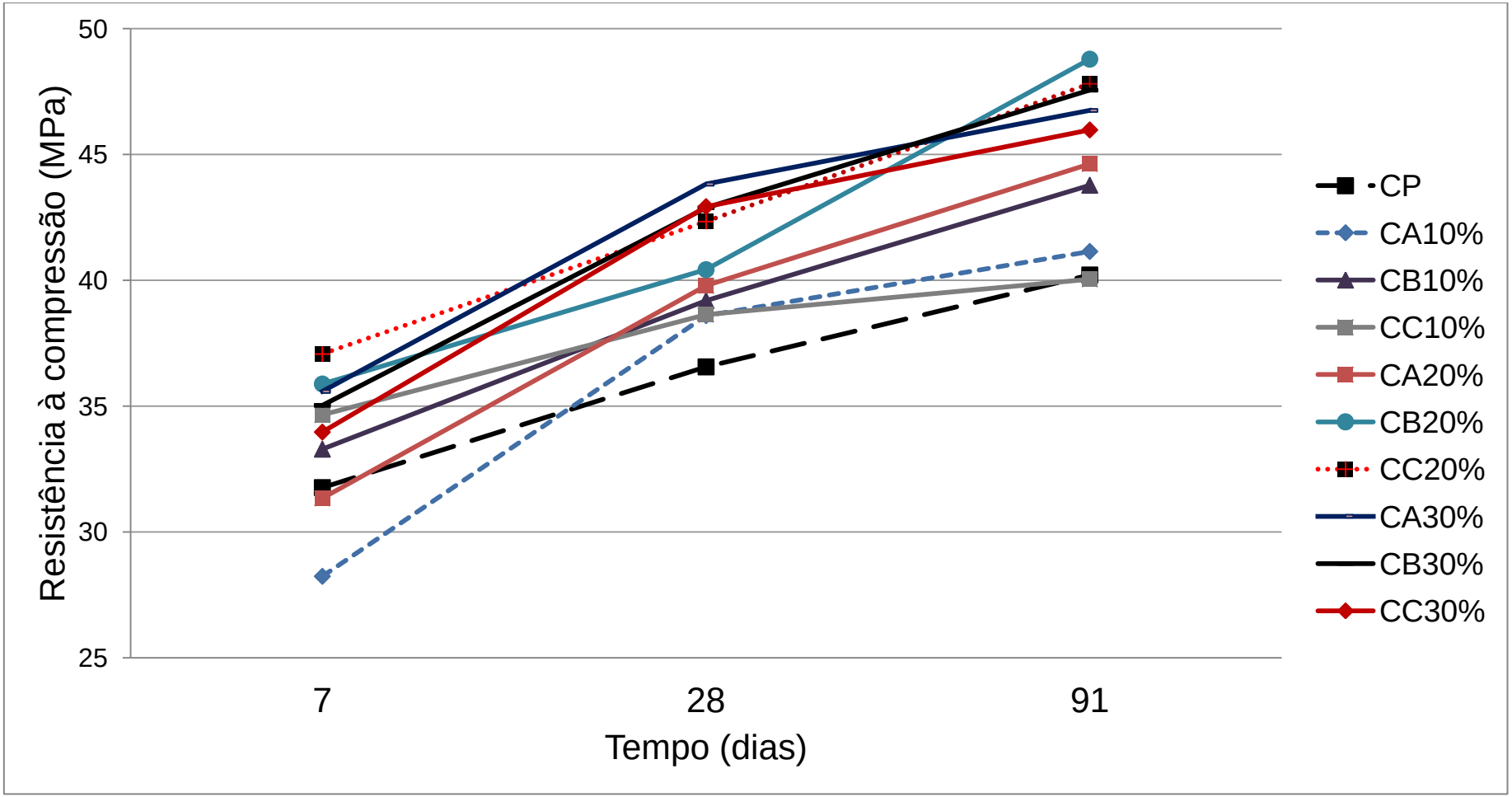


Figura 4.34 - Variação da resistência à compressão das CBC em função das idades.

O aumento da resistência com adição das CBC pode ser explicado pelo efeito fíller, como várias bibliografias têm demonstrado e os resultados obtidos no ensaio de granulometria das cinzas corrobora essa afirmação, visto que se observou um grande volume de partículas finas.

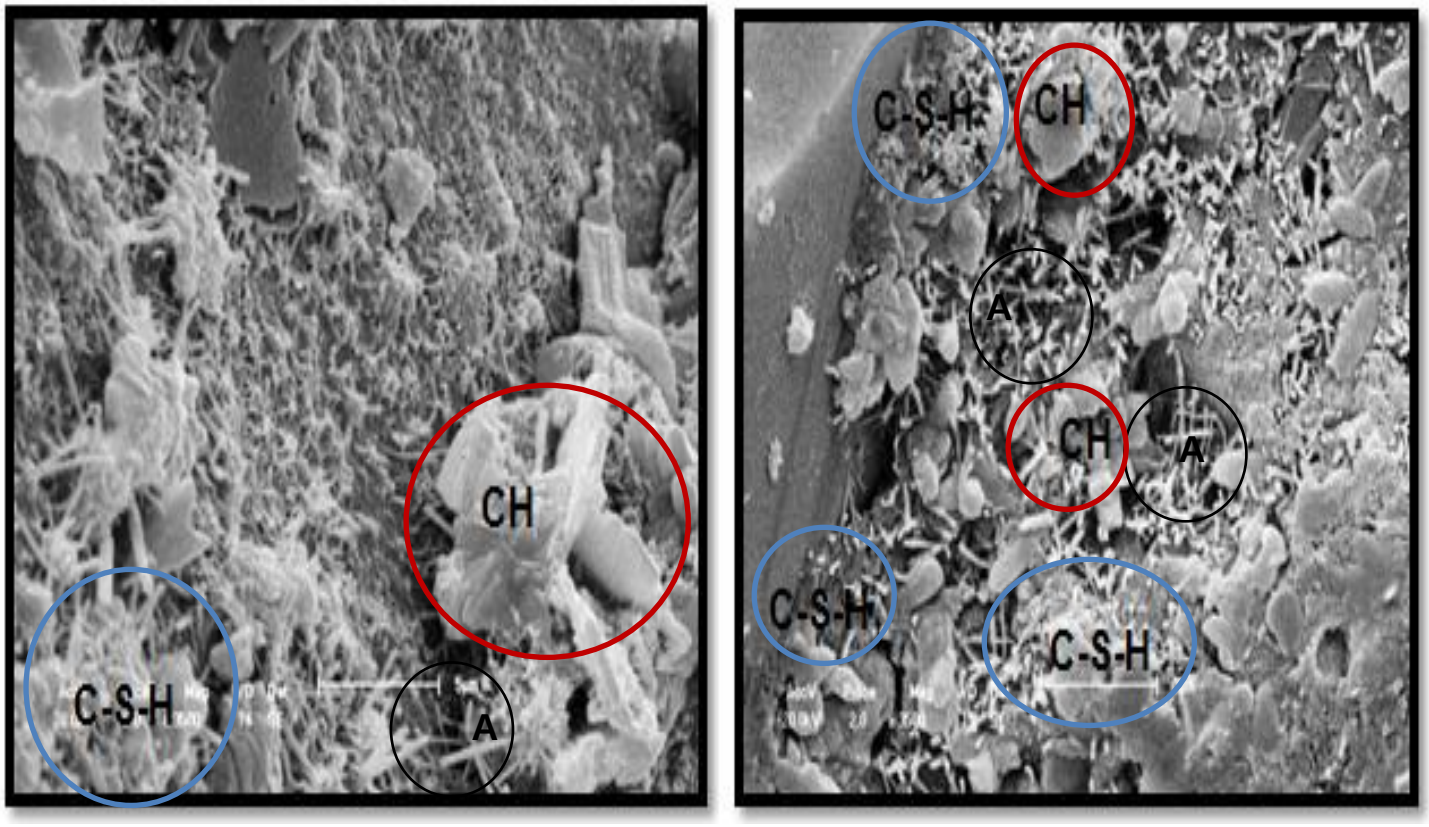
4.1.5.5 Análise microestrutural

Na Figura 4.35 é realizada uma comparação da microestrutura da pasta dos dois concretos, com aumento de 3500 vezes, nas quais pode se observar que a amostra com cinza apresentava maior quantidade de produtos de hidratação. Os cristais de CH e os tufos de C-S-H são mais evidentes e melhor distribuídos na amostra com CBC, o que corrobora a afirmação que tenha havido reação dos produtos de hidratação do cimento com a CBC. Também pode ser visto ainda na Figura (b) as partículas CBC espalhadas na matriz. Nota-se os cristais de CH e as agulhas da estringita tamponando os poros, o que melhora consideravelmente a compacidade do material, fato esse, que tem uma relação direta com os baixos valores de porosidade, absorção e índice de vazios encontrados nesta pesquisa.

A Figura 4.36 mostra com mais detalhes os produtos de hidratação CH e C-S-H, na qual pode-se ver também uma partícula de CBC rodeada por tufos de C-S-H.

Na Figura 4.37 é apresentada outra comparação da microestrutura dos dois concretos, no entanto com um aumento de 5000 vezes. As imagens mostram claramente que a amostra com cinza, além de possuir maior quantidade de produtos de hidratação, os cristais de CH e os tufos de C-S-H têm dimensões maiores se comparados com a do concreto sem cinza, justificando assim os valores altos de resistência mecânica encontrados nas amostras de concreto com cinza.

A Tabela 4.23 mostra todos os resultados das principais propriedades que influenciam no comportamento mecânico dos concretos com adição de CBC obtidos neste trabalho.



(a) Concreto padrão, aumento de 3500X (b) concreto com cinza, aumento de 3500X

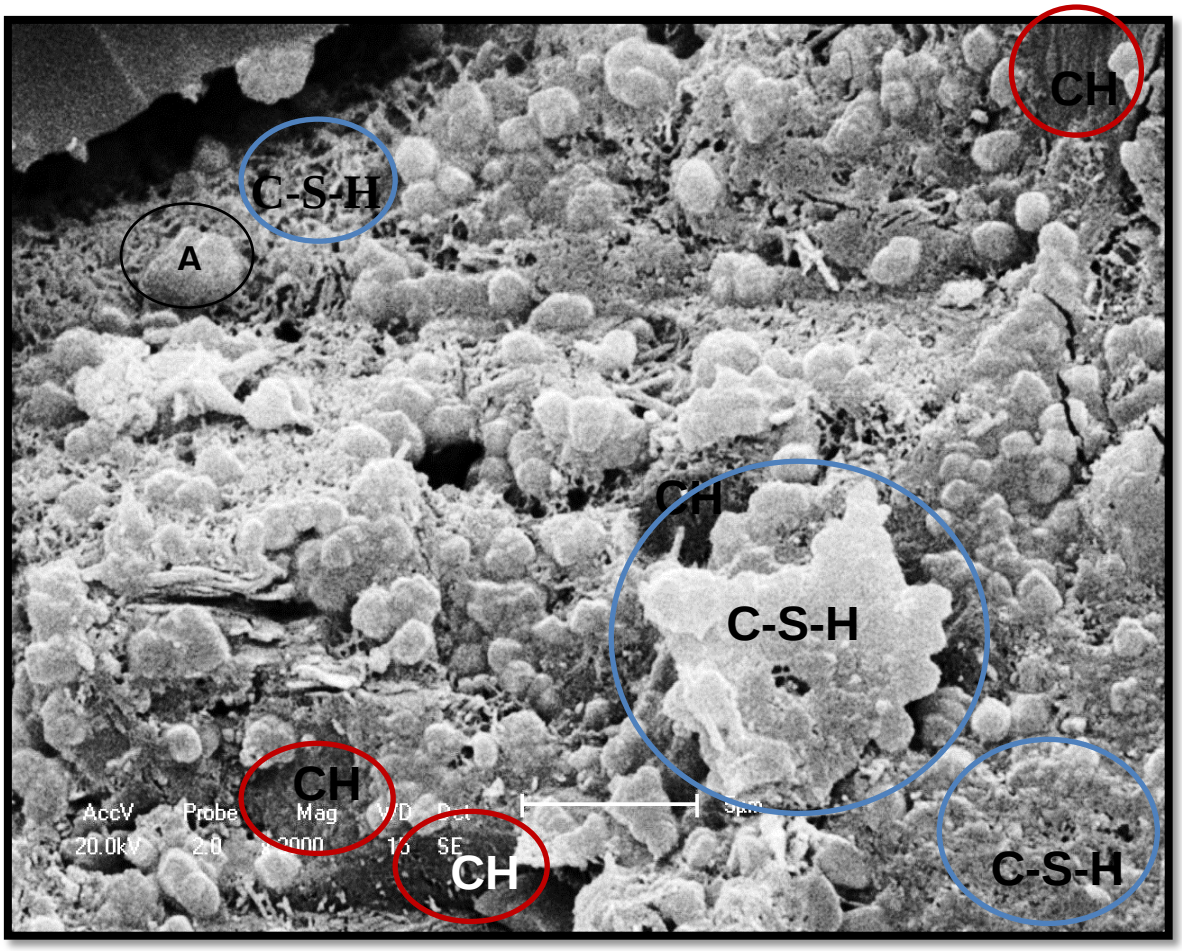
Legenda:

A – Etringita

CH – Hidróxido de cálcio

C-S-H – Silicato de cálcio hidratado

Figura 4.35 – Microestruturas da pasta do concreto sem e com CBC

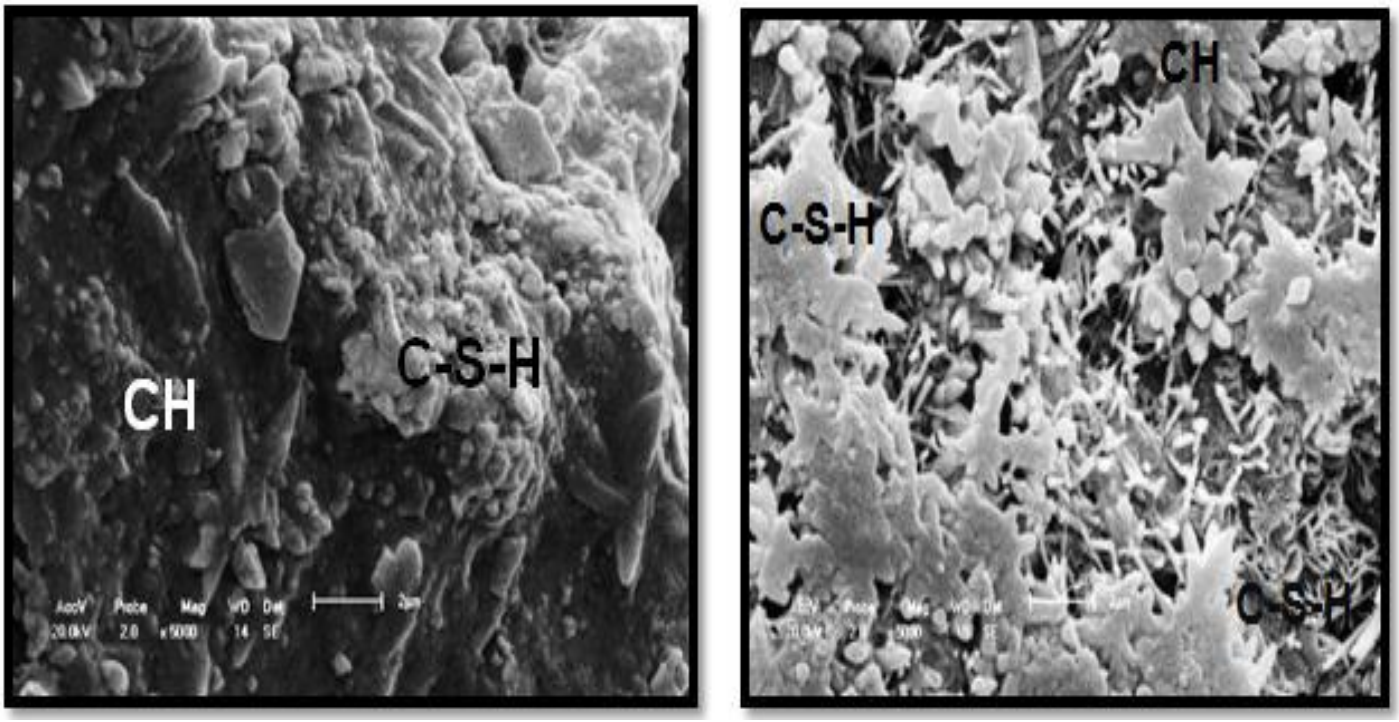


Legenda:

A – Partículas de CBC

B – Poro

Figura 4.36 – Microestrutura da pasta do concreto com CBC com aumento de 3000X



(a) Concreto padrão, aumento de 5000X (b) concreto com cinza, aumento de 5000X

Figura 4.37 – Microestruturas da pasta do concreto sem e com CBC

Tabela 4.23 - Resultados das principais propriedades que influenciam no comportamento plástico e mecânico dos concretos, com adição das variedades de cinzas.

Concreto	Porcentagem de CBC (%)	Abatimento (mm)	Absorção (%)	Índice de vazios (%)	Porosidade total (%)	Massa específica real (g/cm^3)	Resistência à compressão (MPa)		
							7 dias	28 dias	91 dias
CP	0	11,5	5,16	11,87	12,05	2,60	31,76	36,56	40,21
	10	10,5	4,58	10,47	10,96	2,55	28,23	38,60	41,14
CA	20	7	5,04	11,47	11,70	2,57	31,33	39,79	44,63
	30	4,5	4,55	10,40	10,67	2,55	35,58	43,82	46,75
	10	9	3,60	8,44	8,68	2,56	33,29	39,19	43,78
CB	20	10	4,14	9,64	10,08	2,58	35,88	40,42	48,79
	30	6	4,57	10,49	10,75	2,56	35,03	42,89	47,56
	10	10,5	4,64	10,96	10,90	2,65	34,65	38,64	46,75
CC	20	6	3,93	9,12	9,26	2,55	37,07	42,34	47,81
	30	2	4,07	9,40	9,55	2,55	33,97	42,93	45,97

A combustão ineficiente da queima à temperatura de 900 °C resultou num aumento de absorção de água no concreto e diminuição da reatividade das cinzas mostradas nos ensaios de pozolanicidade e DRX. O diâmetro reduzido da CBC, a morfologia das partículas aliado ao baixo potencial pozolânico, resultou em um preenchimento dos poros da matriz cimenticia pelos grãos da cinza. Com o aumento dos teores de incorporação e com a ajuda do efeito fíller, obteve-se uma melhor

compacidade do produto final, tornando o concreto mais resistente. As imagens do MEV mostraram que as partículas da CBC podem também ter reagido com as moléculas de hidróxido de cálcio livre no concreto, diminuindo a porosidade, absorção e índice de vazios e como consequência, uma melhoria nas resistências à compressão dos concretos.

5. Considerações finais

Com base nos resultados obtidos na presente pesquisa, foi possível chegar as seguintes conclusões:

• A incorporação da CBC no concreto diminui a plasticidade e essa redução é mais significativa com o aumento dos teores de incorporação.

• A diminuição na trabalhabilidade é atribuida a combustão incompleta das cinzas à 900° C.

• A adição das CBC no concreto reduz a permeabilidade através do efeito fíller.

• Os concretos com adição de CBC apresentaram uma redução de no mínimo 10% nas propriedades relacionadas à permeabilidade.

• O uso das CBC no concreto em teores de até 30% pode aumentar a durabilidade, pois diminui a porosidade total, a absorção, o índice de vazios e aumenta a resistência.

• A incorporação das CBC no concreto aumenta a resistência à compressão.

• O incremento na resistência à compressão é maior com o aumento dos teores de adição de CBC.

• O acréscimo da resistência foi ocasionado pelo fenômeno de refinamento dos poros presentes na pasta de cimento, conhecido como efeito fíller.

• A variedade de CBC modificou a trabalhabilidade dos concretos, sendo esta mais notável a partir dos 20% de adição.

• As variedades das canas influenciaram nas propriedades mecânicas dos concretos, visto que observou-se uma alteração significativa nos valores de resistência, porosidade, índice de vazios e absorção com a variação dos tipos de cinza.

• Aos 28 dias o concreto CA com 30% de cinza, teve melhor resistência à compressão, 20% maior que o padrão.

• O concreto CB com 20% de cinza apresentou melhor desempenho mecânico aos 91 dias, com resistência 17,5% maior que o concreto padrão e uma redução de 20% nas propriedades relacionadas a permeabilidade.

• Na idade de 7 dias, o concreto CC com 20% de CBC mostrou-se mais eficaz no aumento da resistência à compressão com cerca de 15% em relação ao concreto de referência.

5.1 Sugestões para trabalhos futuros

Para trabalhos futuros relacionados a este estudo são sugeridos os seguintes tópicos:

• Análise da influência da adição de variedades de CBC na durabilidade do concreto;

• Análise da durabilidade de argamassas e concretos confeccionados com substituição parcial das variedades de CBC, segundo a sua resistência à carbonatação, reação álcaliagregado e penetração de íons cloreto;

• Comparação entre variedades de cinzas produzidas em diferentes usinas sucroalcooleiras;

• Influência do tipo de solo de cultivo nas características físicas da cinza geradas no processo de combustão;

• Diferenças em termos de microestrutura das variedades de CBC;

• Mecanismos de interação entre o açúcar e o cimento.

Referências

AGEITEC, Agência **Embrapa de Informação Tecnológica** <Disponível em: <http://www.agencia.cnptia.embrapa.br/gestor/cana-de-acucar/arvore/CONTAG01_42_1110200717570.html> Acesso em: 24. Jun. 2012.

ALMEIDA, Ivan Ramalho de. **Concretos de alto desempenho: evolução tecnológica dos concretos tradicionais.** São Paulo: 1990. Disponível em: < http://dc128.4shared.com/doc/Wk_s0xi1/preview.html>. Acesso em: 24 Abr. 2012.

American Society for Testing and Materials ASTM C 618: **Specification for pozzolanas**, Philadelphi, 1978.

ANDRIOLO, F. R. **Construções de concreto**. São Paulo: Pini,1984. 738p

ANJOS, M. A. S. **Adição do resíduo de biomassa da cana-de-açúcar em pastas para cimentação de poços petrolíferos produtores de óleos pesados.** Tese (doutorado). Universidade Federal do Rio Grande do Norte - UFRN. Natal, 2009.

ANJOS, M. A. S.; MARTINELLI, A. E. (2008). **Caracterização do resíduo da biomassa da cana-de-açúcar para aplicação em pastas cimentícias. 2008. In: 18º Congresso Brasileiro de Engenharia e Ciência dos Materiais – CBECiMat.** Anais. Porto de Galinhas, Brasil. Disponível em: <http://www.cbecimat.com.br/Trab_Completos/113-050.doc>. Acesso em: 23 Out. 2012.

ANJOS, M. A. S.; MOREIRA, H. P.; BORJA, E. V.; PEREIRA, A. C.; NETO, C. A. **Efeito da adição de cinza de biomassa da cana-de-açúcar como finos no concreto auto-adensável.** In: Anais do 52º Congresso Brasileiro do Concreto - IBRACON. Fortaleza, 2010.

ARAÚJO, R.C.L.; RODRIGUES, E.H.V.; FREITAS, E.G.A. **Materiais de construção**. Seropédica, R.J. Editora Universidade Rural, 2000. Disponível em: <http://www.ufrrj.br/institutos/it/dau/profs/edmundo/Concreto%20simples.pdf>. Acesso em: 24 Abr. 2012.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE CIMENTO PORTLAND (ABCP). **Manual de ensaios de agregados, concreto fresco, concreto endurecido.** Associação Brasileira de Cimento Portalnd. São Paulo, 1998. 116p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 12.654**: Controle Tecnológico dos Materiais Componentes do Concreto. Rio de Janeiro, 1992.

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

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5733**: Cimento Portland de alta resistência inicial. Rio de Janeiro, 1991.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5735**: Cimento Portland de alto-forno. Rio de Janeiro, 1991.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5736**: Cimento Portland pozolânico. Rio de Janeiro, 1999.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5738**: Concreto - Procedimento para moldagem e cura de corpos-de-prova. Rio de Janeiro, 2008.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5739**: Concreto - Ensaios de compressão de corpos-de-prova cilíndricos. Rio de Janeiro, 2007.

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

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7215**: Ensaio de cimento Portland. Rio de Janeiro, 1997.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 9479**: Argamassa e concreto - Câmaras úmidas e tanques para cura de corpos-de-prova. Rio de Janeiro, 2006.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 9778**: Argamassa e concreto endurecidos - Determinação da absorção de água, índice de vazios e massa específica. Rio de Janeiro, 2009.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 11578**: Cimento Portland composto – Especificação. Rio de Janeiro, 1997.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 11579**: Cimento Portland - Determinação da finura por meio da peneira 75 µm (n° 200) - Método de ensaio. Rio de Janeiro, 2012.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 11582**: Cimento Portland - Determinação da expansibilidade de Le Chatelier - Método de ensaio. Rio de Janeiro, 2012.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR NM 23**: Cimento portland e outros materiais em pó - Determinação da massa específica. Rio de Janeiro, 2001.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR NM 43**: Cimento Portland - Determinação da pasta de consistência normal. Rio de Janeiro, 2003.

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

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR NM 52**: Agregado miúdo - Determinação da massa específica e massa específica aparente. Rio de Janeiro, 2009.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR NM 53**: Agregado graúdo - Determinação da massa específica, massa específica aparente e absorção de água. Rio de Janeiro, 2009.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR NM 65**: Cimento Portland - Determinação do tempo de pega. Rio de Janeiro, 2003.

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

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

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 12653:2012**: Materiais pozolânicos — Requisitos. Rio de Janeiro, 2012.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5752:2012**: Materiais pozolânicos - Determinação de atividade pozolânica com cimento Portland - Índice de atividade pozolânica com cimento. Rio de Janeiro, 2012.

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

ASSOCIAÇÃO DOS FORNECEDORES DE CANA GUARIBA (2012). **Variedades de cana**. Disponível em: <http://www.coplana.com/gxpsites/hgxpp001.aspx?1,5,316,O,P,0,MNU;C;32;5;MNU;,>. Acesso em: 01 Out. 2012.

AVELINO, Veruska Kelly Gomes Rocha (2011). **Estudo do comportamento no estado fresco e endurecido do concreto com incorporação de resíduo de corte de botão.** Disponível em: < https://docs.google.com/viewer?a=v&q=cache:ZlvnVU-JNckJ:www.sigaa.ufrn.br/sigaa/verProducao%3FidProducao%3D970090%26key%3D9cffe25a3feb29d6f90a1f914a6d1d2b+&hl=pt-BR&gl=br&pid=bl&srcid=ADGEESiW2MyCgysiqN57EBdxgMupaz-KUDz8z3yxwSZkqkTBdFBaX9LlwaSwIA5Jksonq6BplEU-W1ytQnsKAxVtd906cNXOwYGzZuTHEDm8UVjZQz8EEMYXs5j_FbC4GHMht4VmRxLp&sig=AHIEtbSVzcgfoi9d3VfR1LTPdwaRi7pgNA>. Acesso em: 12 Mar. 2012.

AZENHA, Miguel Ângelo Dias. **Comportamento do betão nas primeiras idades.Fenomenologia e análise termo-mecânica**. Universidade do Porto: Faculdade de Engenharia, 2004, p. 10-12.

BARBOZA FILHO, M. P. & PRABHU, A. S. **Aplicação de silicato de cálcio na cultura do arroz** – Circular Técnica 51, Santo Antônio de Goiás: EMBRAPA, 4 p, 2002.

BAUER, Luiz A.F. **Materiais de Construção**. v1. 5ª ed. Rio de Janeiro: LTC, 2000. 447p.

BORJA, Edilberto Vitorino de. **Efeito da adição de argila expandida e adições minerais na formulação de concretos estruturais leves autoadensáveis.** Tese de Doutorado, 2011. Universidade Federal do Rio Grande do Norte.

BREUGEL, K. (1991), **Simulation of hydration and formation of structure in hardening cement-based materials**, Doctoral Thesis, Delft.

CANA-DE-AÇÚCAR. In: **WIKIPÉDIA, a enciclopédia livre**. Flórida: Wikimedia Foundation, 2012. Disponível em: <http://pt.wikipedia.org/w/index.php?title=Cana-de-a%C3%A7%C3%BAcar&oldid=29759273>. Acesso em: 18 Abr. 2012.

CAPELLO, Giuliana. **Cimento ecológico: produto tem nível de co2 reduzido em sua fórmula, causando menos impactos no meio ambiente.** Disponível em: <http;//planetasustentavel.abril.uol.com.br/inc/pop print HTML>. Acesso em: 13 Mar. 2012

CARVALHO, A. dos G. de. **Energia de Ativação dos Concretos, Experimentação e Modelagem**. Tese (Doutorado). Rio de Janeiro, 2002. 134 p. Universidade Federal do Rio de Janeiro, COPPE.

CIMENTO ITAMBÉ. **Aditivo ou adição**. Disponível em: <http://www.cimentoitambe.com.br/massa-cinzenta/aditivo-ou-adicao/> Acesso em: 26 Jan. 2012.

CINCOTTO, M. A. **Selection of waste materials with pozzolanic activity. I**n: International Conference on Development of Low-Cost and Energy Saving Constrution Materials Proceedings. Rio de Janeiro, v. 1, p 287-297, 1984.

COELHO, S. T. **Mecanismo para implementação da co-geração de eletricidade a partir de biomassa: um modelo para o Estado de São Paulo.** São Paulo, 1999. Tese (Doutorado) – Programa Interunidades de Pós-Graduação em Energia, Universidade de São Paulo.

COIMBRA, M. A; LIBARDI, W; MORELLI, M. R. **Utilização de rejeitos de pilha zinco-carvão em argamassas e concretos de cimento Portland.** Revista cerâmica. Vol 50. N 316. P 300-307. 2004. Disponivel em: <http://www.scielo.br/pdf/v50n316/a0450316.pdf>. Acesso em: 13 Mar. 2012.

COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO. **Acompanhamento da safra brasileira.** Brasília, 2011. Disponível em: <http://www.conab.gov.br/>. Acesso em: 28 Jun. 2011.

CORDEIRO, G. C. **Utilização de cinzas ultrafinas do bagaço de cana-de-açúcar e da casca de arroz como aditivos minerais em concreto.** Tese (Doutorado). Universidade Federal do 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**. ACI Materials Journal, v. 105, n. 5, p. 487-493, 2008.

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

CORDEIRO, G. C. TOLEDO FILHO, R. D.; FAIRBAIRN, E. M. R.**Ultrafine sugarcane bagasse ash: high potential pozzolanic material for tropical countries**: Revista do Ibracon de Estruturas e Materiais. Vol.3, n. 1, p.50-67, 2010.

COSTA, António; APPLETON, Júlio. **Estruturas de Betão I: Parte II Materiais**. Instituto Superior Técnico, 2002, p.2. Disponível em: <http://www.civil.ist.utl.pt/~cristina/bape1/materiais.pdf>. Acesso em: 24 Abr. 2012.

COUTINHO, A. S. **Fabrico e propriedades do betão.** 3 ed. Lisboa: Laboratório Nacional de Engenharia Civil, 1997 3V.V3.368P.

COUTINHO, Maria Joana Alvares Ribeiro de Sousa. **Melhoria da durabilidade dos betões por tratamento da confragem**. Tese de Doutoramento, 1998. Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto. Disponível em: < http://www.google.com.br/url?sa=t&rct=j&q=melhoria%20da%20durabilidade%20dos%20bet%C3%B5es%20por%20tratamento%20da%20confragem&source=web&cd=2&ved=0CCwQFjAB&url=http%3A%2F%2Frepositorio-aberto.up.pt%2Fbitstream%2F10216%2F11906%2F2%2FTexto%2520integral.pdf&ei=UwOXT9PMD4Ws8ASG1JC7Dg&usg=AFQjCNHnzvwpYYhQpwS4v7fiye-smbE74A >. Acesso em: 12 Mar. 2012.

DAL MOLIN, D.C.C**. Adições minerais para concreto estrutural**. In: Concreto: Ensino, pesquisa e realizações/ ed. ISAIA, G.C. 1º edição. São Paulo: IBRACON, 2005.

FARIA, E. F. de. **Predição da exotermia da reação de hidratação do concreto através de modelo termo-químico e modelo de dados.** Tese (Doutorado). Rio de Janeiro, 2004. 130 p. Universidade Federal do Rio de Janeiro, COPPE.

FARIAS, Márcio M.; PALMEIRA, Ennio M. Agregados para Construção Civil. In: **Materiais de Construção Civil e Princípios de Ciência e Engenharia dos Materiais.** Ed. G. C. Isaia. 2v. 1 ed. São Paulo: IBRACON, 2007. 1712p. cap.16.

FIESP - **Federação das Indústrias do Estado de São Paulo**. Disponível em: <http://www www.fiesp.com.br/> Acesso em 26 Ago. 2011.

FREITAS, E. de S. **Caracterização da cinza do bagaço da cana-de-açúcar do município de campos dos Goytacazes para uso na construção civil.** Dissertação de Mestrado. Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro, UENF, Rio de Janeiro, 2005. Disponível em: <http://www.uenf.br/Uenf/Pages/CCT/Leciv/?modelo=1&cod_pag=1693&id=4003&np=&tpl=1&grupo=leciv>. Acesso em: 23 Out. 2012.

GABRICH, F. M. **Estudo da Influência das adições Minerais no Comportamento do Concreto sob Ação do Fogo.** Dissertação apresentada ao Programa de Pós-graduação em Construção Civil da Universidade Federal de Minas Gerais, 2008.

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

GIAMMUSSO, Salvador E. **Manual do Concreto**. São Paulo: Pini, 1992.162p.

HELENE, Paulo; ANDRADE, Tibério. Concreto de Cimento Portland. In: ISAIA, G. C. (Org.). **Materiais de Construção Civil e Princípios de Ciência e Engenharia dos Materiais.** ed. G. C. Isaia. 2v. 1 ed. São Paulo: IBRACON, 2007. 1712p. cap. 27.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATISTICA. **Mapas de biomas e de vegetações.** Brasília, 2004. Disponível em: <http://www.ibge.gov.br/home/.../noticia_visualiza.php?.>. Acesso em: 12 Dez. 2011

IPCC – **Intergovernmental Panel on Climate Change**. Climate change 2007: synthesis report 2007.Disponível em: <http://www.ipcc.ch.org> Acesso em: 3 Mar. 2011.

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

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

JUENGER, M.C.; and JENNINGS, H.M. **New insights into the effects of sugar on thehydration and microstructure of cement pastes**. Cement and Concrete Research 32(3): 393-9, March, 2002.

KRAUSHAAR, J. J. ; RISTINEN, R. A. **Energy and problems of Technical Society**. John Wiley & Sons, Revised Edition, USA, 1988.

Laboratório Nacional de Engenharia Civil Especificação 477 (LNEC E 477): **Betões - Guia para utilização de ligantes hidráulicos**, Portugal, 2007.

LIMA, S. A; SALES, A.; MORETTI, J. P.; ALMEIDA, F. C. R.; SANTOS, T. J. (2010). **Caracterização de concretos confeccionados com a cinza do bagaço da cana-de-açúcar. Tema Caracterização de Materiais.** CINPAR 2010 – VI Congresso Internacional sobre patologia e reabilitação de estruturas. Córdoba, Argentina: 2, 3 e 4 de Jun. de 2010.

MACEDO, P. C. **Avaliação do desempenho de argamassas com adição de cinza do bagaço de cana-de-açúcar. 2009.** Dissertação (Mestrado). Universidade Estadual Paulista, Ilha Solteira, SP. p - 83.

MAPA - **Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento**. Disponível em: <http://www.agricultura.gov.br/vegetal/culturas/cana-de-acucar>. Acesso em: 25 Set. 2011.

MALHOTRA, V. M; MEHTA, P. K. **Pozzolanic and cementitious materials. - advances in concrete Technology**, 1996.

MARTINS, C. H.; MACHADO, P H. T. **Estudo da utilização da cinza do bagaço da cana-de-açucar em argamassas e concretos.** In: ECMEC2010- Encontro Nacional de Materiais e Estruturas compósitas, 2010, Porto. Anais do ECMEC 2010. Porto: Editora da Universidade do Porto.

MARTINS, C. H., ZANELLA, R. M; PAULINO Jr. R. **Potencial do uso da cinza do bagaço de cana-de-açúcar como agregado miúdo.** In 1 seminário de Engenharia Urbana – SEUEM, 2007. Anais, Maringá, Brasil.

MARTIRENA HERNÁNDEZ, J. F. M.; MIDDEENDORF, B.; GEHRKE, M.; MASSAZZA, F., COSTA, U. **Aspects of the pozzolanic activity and properties of pozzolanic cements**; Il Cemento 76:3-18; Jan.-March 1979.

MARTIRENA HERNÁNDEZ, J. F. M., MIDDEENDORF, B., GEHRKE, M., BUDELMANN, H., **Use of wastes of the sugar industry as pozzolana in limepozzolana binders: study of the reaction.** Cement and Concrete Research, v. 28, n. 11, pp. 1525-1536, 1998.

MASSAZZA, F. **Pozzolana and pozzolanic cements.** In: Hewlett, P.C. (ed.), Lea's chemistry of cement and concrete, 4th edition, J. Wiley. New York 2004.

MEHTA, P. K.; MONTEIRO, P. J. M. **Concreto: Estrutura Propriedades e Materiais.** São Paulo: Pini, 1994. 573 p.

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

MEHTA, P.K. **Natural Pozzolan**. In: Suplementary Cementing Materials. Ottawa: V. M. Malhotra. 1987. 427p

MESA VALENCIANO, M. C., FREIRE, W. J. **Características físicas e mecânicas de misturas de solo, cimento e cinzas de bagaço de cana-de-açúcar.** Engenharia Agrícola, Jaboticabal, v. 24, n. 3, p. 484-492, 2004.

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

MORALES, E.V.; VILLAR-COCIÑA , E.; FRÍAS, M.; SANTOS, S.F.; SAVASTANO JR, H. **Effects of calcining conditions on the microstructure of sugar cane wastes ashes (SCWA): Influence in the pozzolanic activation.** Cement & Concrete Composites 31, 22-28, 2009.

NEVILLE, A. **Propriedades do concreto**. São Paulo: PINI. 1997.

NÓBREGA, A, K. C. **Materiais cimentantes de pega rápida à base de metacaulin.** Natal, 2006. 93p. Dissertação (Mestrado), Programa de Pós-Graduação em Ciências e Engenharia de Materiais, Universidade Federal Do Rio Grande Do Norte.

NORTON, F. H.,**Introdução à tecnologia cerâmica**. 1a. ed, Edgar Blucher Ltda, SãoPaulo, 1973, p. 37.

NUNES, I. H. S. **Estudo das características físicas e químicas da cinza do bagaço de cana-de-açúcar.** Dissertação de Mestrado. PEU / Universidade Estadual de Maringá, 2009. Disponível em: <http://periodicos.uem.br/ojs/index.php/RevTecnol/article/view/8728> Acesso em: 23 Out. 2012.

NUNES, I.H.S.; VANDERLEI, R.D.; SECCHI, M.; ABE, M.A.P. **Estudo das características físicas e químicas da cinza do bagaço de cana-de-açúcar para uso na construção.** Revista Tecnológica, v. 17, p. 39-48, 2008.

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

PAULA, M. O. de; TINÔCO. I. F. F.; RODRIGUES, C. S.; SILVA, E. N. S.; SOUZA, C. F. (2009). **Potencial da cinza do bagaço da cana-de-açúcar como material de substituição parcial de cimento Portland.** Disponível em: <http://www.scielo.br/pdf/rbeaa/v13n3/v13n03a19.pdf>. Acesso em: 23 out. 2012.

PERUZZI, A. de P. **Comportamento das Fibras de Vidro Convencionais em Matriz de**
Cimento Portland Modificada com Látex e Adição de Sílica Ativa. Dissertação (Mestrado). São Carlos, 2002. USP, Escola de Engenharia de São Carlos.

PETRUCCI, E. G. R. **Concreto de cimento Portland.** 6 ed. Atualizada e revisada por Vladimir Antônio Paulon. Porto Alegre: Globo, 1978. 307p.

PETRUCCI, E. G. R. **Concreto de Cimento Portland**. Porto Alegre: Globo, 1980. 435p.

PIRES, Fátima. **Maior produção de cana-de-açúcar da história do Brasil.** RankBrasil Recordes Brasileiros, abril 2012. Disponível em: <http://www.rankbrasil.com.br/Recordes/Materias/0Lul/Maior_Producao_De_Cana_de_acucar_Da_Historia_Do_Brasil> Acesso em: 19 Abr. 2012.

PRUDÊNCIO Jr., et al. **Cinza da casca de arroz.** In: Utilização de Residuos na Construção Habitacional, coleção Habitare, v.4, Porto Alegre: ANTAC

SÁ, Maria das V. V. A. **Influência da substituição de areia natural por pó de pedra no comportamento mecânico, microestrutural e eletroquímico de concretos**. Tese. Universidade Federal do Rio Grande do Norte. Centro de Ciências Exatas e da Terra. Programa de Pós-Graduação em Ciência e Engenharia de Materiais. 2006.

SALES, A.; LIMA, S. A. **Use of Brazilian Sugarcane Bagasse Ash in Concrete as Sand Replacement.** Waste Management, v. 30, n. 6, p. 1114-1122, 2010.

SANTOS, Maria Luiza DE Oliveira. **Aproveitamento de resíduos minerais na formulação de argamassas para a construção civil.** Domínio Público, 2008. Disponível em: <http://www.dominiopublico.gov.br/pesquisa/DetalheObraForm.do?select_action=&co_obra=120571>. Acesso em: 24 Abr. 2012.

SANTOS, S. **Estudo da viabilidade de utilização de cinza de casca de arroz residual em argamassas e concretos.** 1997. 113 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia) - Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 1997.

SANTOS, S. **Produção e Avaliação do uso de pozolana com baixo teor de carbono obtida da cinza de casca de arroz residual para concreto de alto desempenho.** Tese (Doutorado). Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2006, 267p.

SILVA A, N. G; CAMPITELI, V.C. **Influência dos finos e da cal nas propriedades das argamassas**. In: XI Encontro Nacional De Tecnologia No Ambiente Construído. Anais. Cd Rom. Florianopolis, 2006. p. 4343-4358.

SILVA, C. A. R. **Estudo da influência da incorporação da cinza de casca de arroz no concreto.** Ilha Solteira, 2004. 96f. Dissertação (Mestrado) - Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira, Universidade Estadual Paulista, Ilha Solteira, 2004.

SILVA, Fernanda Giannotti da. **Estudo de concretos de alto desempenho frente à ação de cloretos.** Tese de Doutorado, 2006. Universidade de São Paulo. Disponível em: < http://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/88/88131/tde-26072006-135429/pt-br.php>. Acesso em: 24 Abril 2012.

SILVEIRA, A. A. **A utilização da cinza de casca de arroz com vistas à durabilidade de concretos: estudo do ataque por sulfatos.** Dissertação de Mestrado UFRGS, Porto Alegre, 1996, 139p.

SINGH, N.B.; SINGH, V.D.; RAI, Sarita. **Hydration of bagasse ash-blended portland cement.** Cement and concrete research 30, 1485-1488, 2000.

SOUZA, G. N. *et al.* **Denvolvimento de Argamassas com Substituição Parcial do Cimento Portland por Cinzas Residuais do Bagaço de Cana-de-Açúcar.** In: CONGRESSO BRASILEIRO DO CONCRETO, 49, 2007, Bento Gonçalves. Anais. São Paulo: IBRACON, 2007.

SOUZA, Paulo Alysson Brilhante Faheina de. **Estudo do comportamento plástico, mecânico, microestrutural e térmico do concreto produzido com resíduo de porcelanato.** Bibioteca Digital UFG, 2007. Disponível em: < http://bdtd.bczm.ufrn.br/tedesimplificado//tde_busca/arquivo.php?codArquivo=1416 >. Acesso em: 24 Abr. 2012.

SOUZA, V. C. M.; RIPPER, T. (1998) **Patologia, Recuperação E Esforço De Estruturas de Concreto**. São Paulo: PINI ,1998.

SOUZA, Z.; AZEVEDO, P. F. **Geração de Energia Elétrica Excedente no Setor Sucroalcooleiro: um estudo a partir das usinas paulistas**. Rev. Econ. Sociol. Rural, Brasília, v. 44, n. 2, 2006.

SPONHOLZ, I.; PRUDÊNCIO JR, L. R.; STEIL, R. **Estudo comparativo de diferentes metodologias para a seleção de aditivos redutores de água para o concreto de alto desempenho.** Trabalho 15. In: Congresso Brasileiro do Concreto – REIBRAC/IBRACON, 40, Rio de Janeiro. Anais. Rio de Janeiro,RJ, 1998.

TARTUCE, Ronaldo; GIOVANNETTI, Edio. **Princípios Básicos sobre Concreto de Cimento Portland**. São Paulo: PINI: IBRACON, 1990. 107p.

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

TECMULT. **Ficha técnica**. Disponível em: <http://www.rheoset.com.br/hotsite/fichas-tecnicas/tecmult.pdf>. Acesso em: 19 Out. 2012.

TUTIKIAN, B. F. **Método para dosagem experimental para concretos auto-adensáveis**. Dissertação (mestrado). Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2004.

UNICA, **União da Indústria da Cana-de-Açúcar.** Disponível em: <http://www.unica.com.br> Acesso em: 13 Fev. 2012.

VERÇOZA, Enio J. **Materiais de Construção**. 2ed. Porto Alegre: Sagra, 1984. 153p.

ZARDO, A. M. **Utilização da cinza de bagaço de cana-de-açúcar como “fíller” em compostos de fibrocimento**. I ENCONTRO LATINO-AMERICANO DE CONSTRUÇÃO SUSTENTÁVEL. Anais. São Paulo: 2004.