

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

JOENILSON DANIEL AGASSI

**AVALIAÇÃO DA CARBONATAÇÃO EM CONCRETOS COM CINZA
DO BAGAÇO-DA-CANA DE AÇÚCAR**

MARINGÁ

2011

JOENILSON DANIEL AGASSI

**AVALIAÇÃO DA CARBONATAÇÃO EM CONCRETOS COM CINZA
DO BAGAÇO-DA-CANA DE AÇÚCAR**

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

Orientador: Prof. Dr. Romel Dias Vanderlei.

MARINGÁ
2011

JOENILSON DANIEL AGASSI

**AVALIAÇÃO DA CARBONATAÇÃO EM CONCRETOS COM CINZA
DO BAGAÇO-DA-CANA DE AÇÚCAR**

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

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. Romel Dias Vanderlei (Orientador) - UEM

Prof. Dra. Cristiane Pauletti - UFRGS

Prof. Dr. José Aparecido Canova - UEM

Maringá, 30 de março de 2011.

RESUMO

A necessidade de fontes renováveis impulsiona a produção de álcool no mundo, principalmente no Brasil, que possui a maior produção tanto de álcool como de açúcar, o clima ideal e a tecnologia de ponta também contribuem, fazendo do Brasil o maior produtor de combustível substituto aos combustíveis derivados do petróleo. Em seu processo de fabricação ocorre à geração de um subproduto, o bagaço da cana-de-açúcar, utilizado pelas sucroalcooleiras na co-geração de energia, que tem como resíduo secundário a cinza do bagaço da cana-de-açúcar (CBC). Este resíduo pode ser aproveitado como agregado miúdo na produção de concretos e argamassas, minimizando assim a extração de recursos naturais, preservando as margens dos rios e contribuindo para a disposição adequada desse resíduo. Este trabalho tem como objetivo avaliar a influência da CBC nas propriedades do concreto, quando utilizada como agregado miúdo substituindo parcialmente a areia natural, através do estudo da resistência à compressão e da carbonatação. O concreto foi produzido com cimento Portland CPV-ARI, areia de origem quartzosa e pedra britada de origem basáltica, sendo que a areia foi substituída parcialmente por CBC nos teores de 0, 5, 10, 15, 20, 25, 30, 40 e 50%, em massa. Os resultados dos ensaios de resistência à compressão demonstram que houve aumento da resistência para substituição da areia por CBC em até 25%, em comparação ao concreto de referência (0%), sendo o teor de 20% o que obteve maior ganho de resistência, 6,6% acima do padrão. Os resultados da análise estatística da frente de carbonatação acelerada mostraram que o concreto com menor despassivação foi o contendo 15% de CBC, apresentando frente de carbonatação 67,8% a menos que o concreto padrão. Verificou-se também que houve diminuição da camada carbonatada nos concretos com substituição de até 30% da areia por CBC. Este estudo procurou esclarecer algumas dúvidas quanto à durabilidade dos concretos contendo CBC e proporciona uma alternativa segura de substituição de agregados miúdos para construção civil.

Palavras-chave: cinza de bagaço da cana-de-açúcar; concreto; durabilidade; carbonatação acelerada.

ABSTRACT

The need for renewable sources boosts the production of alcohol in the world, mainly in Brazil, which has the highest production of both ethanol and sugar, the ideal weather and high technology also contribute, making Brazil the largest producer of substitute fuel to fuels derived from petroleum. In its manufacturing process occurs the generation of a by-product, bagasse used from the sugar and alcohol sector companies in the co-generation power, which has as a secondary waste the ash from the sugar cane bagasse (SCB). This residue can be used as a fine aggregate in the production of concrete and mortar, thus minimizing the extraction of natural resources, preserving the river banks and contributing to the proper disposal of that residue. This study aims to evaluate the influence of the SCB in concrete properties when used as fine aggregate partially replacing the natural sand, through the study of the resistance to compression and carbonation. The concrete was produced with CPV-ARI Portland cement, sand of quartz origin and crushed stone of basaltic origin, and the sand was partially replaced by SCB in the levels of 0, 5, 10, 15, 20, 25, 30, 40 and 50% in mass. The test results from the compression resistance showed that there was an increasing to the replacement of sand by SCB up to 25% compared to the reference concrete (0%), with a level of 20% the one which gained more resistance, 6.6% above the standard. The results of statistical analysis of the accelerated carbonation front showed that the concrete with the less depassivation was the one containing 15% of SCB, with a carbonation front of 67.8% less than the standard concrete. It was also found that there was a decrease in the carbonated layer in the concrete with replacement up to 30% of sand by the SCB. This study is trying to clarify some doubts about the durability of concrete containing SCB and provides a safe alternative of fine aggregates replacement for civil construction.

Keywords: ash from sugar cane bagasse, concrete, durability, accelerated carbonation.

Sumário

RESUMO	ii
ABSTRACT	iii
Lista de Tabelas	vi
Lista de Figuras	vii
1 INTRODUÇÃO	1
1.1 Justificativa do Trabalho	2
1.2 Objetivos	3
1.3 Estrutura da Dissertação.....	3
2 REVISÃO DE TEÓRICA	4
2.1 Cana-de-Açúcar.....	4
2.2 Produção da Cana-de-Açúcar	5
2.3 Resíduos Gerados pela Cana-de-açúcar	9
2.4 Produção de CBC.....	10
2.4.1 Estudo da Geração de Cinza na Usina Santa Terezinha.	11
2.5 Estudos Utilizando CBC no Concreto ou Argamassas	25
2.5.1 Estudos Utilizando CBC proveniente da Usina Santa Terezinha	27
2.5.1.1 Estudo das Características Físicas e Química da CBC - NUNES (2009)	27
2.5.1.2 Diagramas de Dosagem para Concretos com a Utilização da CBC como Adição Mineral - SECCHI (2010).....	29
2.5.1.3 Desenvolvimento de Concretos de Alta Resistência Utilizando a CBC como Adição Mineral - ABE (2010)	32
2.5.1.4 Avaliação do Desempenho da CBC na Produção de Concretos - SOUTO (2010)	33
2.6.1 Carbonatação	35
2.6.1.1 Fatores que Influenciam a Carbonatação	40
2.6.1.2 Determinação da Carbonatação	43
3 MATÉRIAS E MÉTODOS	45
3.1 Materiais.....	45
3.1.1 Cimento Portland	45

3.1.2 Agregado Miúdo.....	45
3.1.3 Agregado Graúdo	46
3.1.4 Água.....	46
3.1.5 Cinza do bagaço da cana-de-açúcar	46
3.2 Métodos.....	51
3.2.1 Programa Experimental.....	51
3.2.1.1 Dosagem do concreto e Preparo dos corpos-de-prova	52
3.2.2 Trabalhabilidade do Concreto (abatimento do tronco de cone)	55
3.2.3 Cura do concreto	56
3.2.4 Resistência à compressão	56
3.3 Carbonatação.....	57
3.3.1 Preparo das amostras utilizadas para a determinação da carbonatação	57
3.3.1.1 Corte das amostras	57
3.3.1.2 Pré-condicionamento.....	57
3.3.1.3 Impermeabilização e selagem.....	58
3.3.1.4 Ensaio de Carbonatação Acelerada.....	59
3.3.1.5 Procedimentos para Obtenção dos Resultados	61
4 RESULTADOS E DISCUSSÃO	64
4.1 Resistência à compressão do concreto	64
4.2 Carbonatação.....	65
4.3 Análise Descritiva	67
5 CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	72
5. 1 Trabalhos Futuros.....	73
6 BIBLIOGRAFIA.....	74

Lista de Tabelas

Tabela 1 – Estimativa da produção de açúcar e etanol para a safra de 2011 no Brasil.....	7
Tabela 2 - Resistência à compressão obtidos por Nunes (2009)	27
Tabela 3 - Média das resistências em função da idade e teor de CBC, abatimento 60mm.....	29
Tabela 4 - Média das resistências em função da idade e teor de CBC, abatimento 90mm.....	30
Tabela 5 - Resultados da resistência a compressão de Abe (2010)	32
Tabela 6 – Resistência à compressão axial do concreto obtido por Souto (2010)	33
Tabela 7 - Módulo de deformação obtido por Souto (2010)	34
Tabela 8 - Resistência a tração por compressão diametral obtido por Souto (2010).....	34
Tabela 9 - Características dos estudos de carbonatação realizados por diversos pesquisadores.....	38
Tabela 10 - Caracterização do cimento CPV - ARI	45
Tabela 11 - Caracterização do agregado miúdo.....	45
Tabela 12 - Caracterização do agregado graúdo.....	46
Tabela 13 – Teor de umidade, matéria orgânica total e carbono orgânico.....	47
Tabela 14 - Massa Especifica da CBC.....	49
Tabela 15 - Porcentagem passante (%).....	50
Tabela 16 – Porcentagem retida – classificação granulométrica NBR 6502/1995	50
Tabela 17 - Coeficientes de uniformidade e curvatura.....	50
Tabela 18 - Programa de concretagem.....	51
Tabela 19 - Traço utilizados (em massa)	54
Tabela 20 - Resistência aos 28 dias	64
Tabela 21 - Mediana da frente de carbonatação (mm)	66

Lista de Figuras

Figura 1- Crescimento da cultura da cana-de-açúcar	4
Figura 2 - Constituintes físicos da cana-de-açúcar	5
Figura 3 - Principais países produtores de cana-de-açúcar.....	6
Figura 4 - Evolução da produtividade da cana-de-açúcar ao longo dos anos.....	8
Figura 5 - Fluxograma de geração de cinza	12
Figura 6 - Transporte da cana-de-açúcar	14
Figura 7 - Cargueiro com abertura de coleta de dados.....	15
Figura 8 - Lavagem da cana-de-açúcar.....	16
Figura 9 - Trituração da cana-de-açúcar	17
Figura 10 - Bagaço úmido.....	18
Figura 11 - Bagaço seco.....	18
Figura 12 – Esteira transportadora de bagaço.....	19
Figura 13 - Alimentador de caldeira.....	19
Figura 14 - Conjunto das esteiras responsável pelo transporte do bagaço.....	20
Figura 15 - Depósito de bagaço.....	21
Figura 16 - Caldeiras.....	21
Figura 17 - Combustão do bagaço.....	22
Figura 18 - Eliminação da cinza retida no sistema de chicanas	23
Figura 19 - Eliminação da cinza junto com os gases	23
Figura 20 - Depósito de cinzas 1.....	24
Figura 21 - Depósito de cinzas 2.....	25
Figura 22 - Representação esquemática do processo de carbonatação	36
Figura 23- Corte dos corpos-de-prova	43
Figura 24 – Corpo-de-prova carbonatado.....	44
Figura 25 - DR - X da Cinza do bagaço da cana-de-açúcar	48
Figura 26 - Diagrama de dosagem do traço de referência.....	53

Figura 27 - Concretagem dos corpos-de-prova.....	55
Figura 28 - Determinação de abatimento pelo método slump test	56
Figura 29 - Corte dos CP's	57
Figura 30 - Pré-condicionamento das amostras	58
Figura 31 - Amostra impermeabilizada (a esquerda) e não impermeabilizada (a direita)	59
Figura 32 - Câmara de carbonatação 1 sendo preenchida com os CP's	60
Figura 33 - As duas câmaras de carbonatação.....	60
Figura 34 - Rompimento para medida da frente de carbonatação	61
Figura 35 - Aspersão de fenolftaleína	62
Figura 36 - Medida da frente de carbonatação	63
Figura 37 - Variação de resistência a compressão.....	65
Figura 38 - Frente de carbonatação média	67
Figura 39 - Profundidade carbonatada 14 dias.....	69
Figura 40- Profundidade carbonatada 28 dias.....	70
Figura 41- Profundidade carbonatada 56 dias.....	71

1 INTRODUÇÃO

O concreto devido sua alta resistência mecânica, facilidade em que é moldado para os mais diversos tipos de obras e custo relativamente baixo, são os pontos que difundiram sua utilização na engenharia.

Mehta e Monteiro (2008) estimam que a produção de concreto seja na ordem de 11 bilhões de toneladas ao ano. O crescimento da produção de cimento, visando suprir o aumento da demanda de concreto, resultou em alguns efeitos danosos, como o prejuízo ao meio ambiente, em função do aumento da extração de matéria-prima e da emissão de CO₂. A produção de cimento é responsável por quase 1/10 das emissões globais. A fabricação de uma tonelada de clínquer de cimento Portland, lança quase uma tonelada de CO₂ na atmosfera, sendo uma contribuição significativa para o efeito estufa existente no planeta.

Na contramão da produção de produtos considerados poluentes, como é o caso do cimento, ou pela extração de recursos naturais finitos, como é o caso da areia, a substituição desses produtos por alguns determinados tipos de resíduos torna-se uma alternativa viável ao desenvolvimento sustentável para construção civil, visto que essa medida também minimiza a disposição inadequada do resíduo na natureza. Um exemplo de resíduo utilizado para este fim, que vem ganhando destaque no meio acadêmico, é a cinza do bagaço da cana-de-açúcar (CBC).

O Brasil é o maior produtor agrícola de cana-de-açúcar do mundo, tem previsão de produção de cana moída em 2010/2011 é de 624.991 mil toneladas, possui ainda o maior programa de combustível substituto aos derivados do petróleo (CONABE, 2011).

O álcool tem sido cada vez mais importado por nações de primeiro mundo, visando reduzir a emissão de poluentes na atmosfera e a dependência por combustíveis fósseis, o que torna o Brasil referência por possuir a tecnologia de ponta, desenvolvida através do Programa Nacional do Alcool (PROÁLCOOL).

As usinas sucroalcooleiras têm como principal resíduo gerado o bagaço da cana-de-açúcar, normalmente, este subproduto é empregado como combustível em processos de co-geração de energia. Após a combustão, são geradas cinzas residuais cuja composição química é predominante de dióxido de silício (SiO₂). Para cada tonelada de cana-de-açúcar que alimenta o processo de moagem são gerados aproximadamente 26% do volume de bagaço com

umidade próxima de 50%, que quando queimado produz 0,62% de cinza residual (CORDEIRO, 2006).

A utilização da CBC têm sido difundida possibilitando a redução dos problemas ambientais, estes estudos tem sido desenvolvidos com a possibilidade de adições na fabricação de concretos. O estudo sobre o emprego da cinza residual do bagaço como aditivo mineral ainda é recente e necessita de aprofundamentos.

1.1 Justificativa do Trabalho

A necessidade de fontes renováveis de energia impulsiona os investimentos pesados na produção de álcool, tornando o Brasil privilegiado por ser o pioneiro na produção desse combustível, e por ser detentor de clima ideal (tropicais e subtropicais) para o desenvolvimento desta cultura. Os resíduos de biomassa da cana-de-açúcar da indústria sucroalcooleira despertam interesse devido a sua disponibilidade crescente, visto a expansão da demanda por combustíveis menos poluentes e energias renováveis.

Um desafio atual enfrentado pela indústria do concreto consiste no desenvolvimento de tecnologias que promovam a preservação do meio ambiente. Por ter constituição predominantemente de dióxido de silício (SiO_2), a cinza do bagaço da cana-de-açúcar (CBC) pode ser utilizada como matéria-prima para a produção de concreto (SOUZA et al., 2007).

Dentro deste contexto, nos últimos anos têm-se intensificado os estudos visando solucionar os problemas gerados pela produção de clínquer, através da substituição parcial do cimento por materiais cimentícios e/ou pozolânicos no concreto. Entre os materiais utilizados nas adições podemos citar a cinza volante, a escória de alto-forno, a sílica ativa, a metacaulinita e a cinza da casca de arroz. Em geral, estes são resíduos de processos industriais ou agroindustriais. (CORDEIRO, 2006).

A possibilidade de incorporação de cinza do bagaço da cana-de-açúcar, pela indústria de concreto, merece destaque principalmente no Brasil, devido ao montante gerado diariamente.

Assim, uma das possíveis soluções para essa questão é o aproveitamento da cinza do bagaço da cana-de-açúcar em substituição parcial de agregado miúdo na produção de concretos. Portanto, este estudo é viável por tratar de uma necessidade atual, possibilitando a mitigação e minimização de impactos ambientais relativos à extração de matéria-prima e disposição de resíduos.

1.2 Objetivos

Este trabalho tem como objetivo avaliar o comportamento da CBC quando utilizada na construção civil como agregado miúdo na produção de concretos, através do estudo de propriedades mecânicas e de durabilidade, como alternativa sustentável.

Para o alcance do objetivo são definidos os objetivos específicos:

- Produzir concretos utilizando as cinzas do bagaço da cana em diferentes proporções substituindo parcialmente à areia;
- Avaliar a resistência a compressão dos corpos de prova utilizando a metodologia preconizada na Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT);
- Avaliar a durabilidade dos concretos produzidos com a cinza baseado no parâmetro de carbonatação.

1.3 Estrutura da Dissertação

O trabalho é organizado em cinco capítulos:

- Capítulo 1 - trata da introdução ao tema, abordando a importância do trabalho e seus objetivos;
- Capítulo 2 – revisão teórica explicando os produtos alvos da pesquisa;
- Capítulo 3 – apresenta o programa experimental, métodos de ensaio;
- Capítulo 4 – apresenta resultados e discussões;
- Capítulo 5 – dedicado as considerações finais;
- Capítulo 6 – bibliografia.

2 REVISÃO DE TEÓRICA

2.1 Cana-de-Açúcar

A planta de cana-de-açúcar é uma gramínea semiperene, pertencente ao gênero *Saccharum*, e apresenta máximo desenvolvimento de produção em sua fase vegetativa. O desenvolvimento da planta está associado às condições da fertilidade do solo e propriedades físicas, embora esta cultura facilmente se adapte bem a solos pobres. Os ciclos da cana podem ser de duas formas: o ciclo onde a cana apresenta evolução em 12 meses, chamado de cana de ano ou de cana de 12 meses; e ciclo em que a cana se desenvolve em 18 meses chamado de cana de ano e meio ou de cana de 18 meses como ilustrado na Figura 1. Após o primeiro corte os ciclos ficam homogêneos, todos de 12 meses (SIMÕES, 2004).

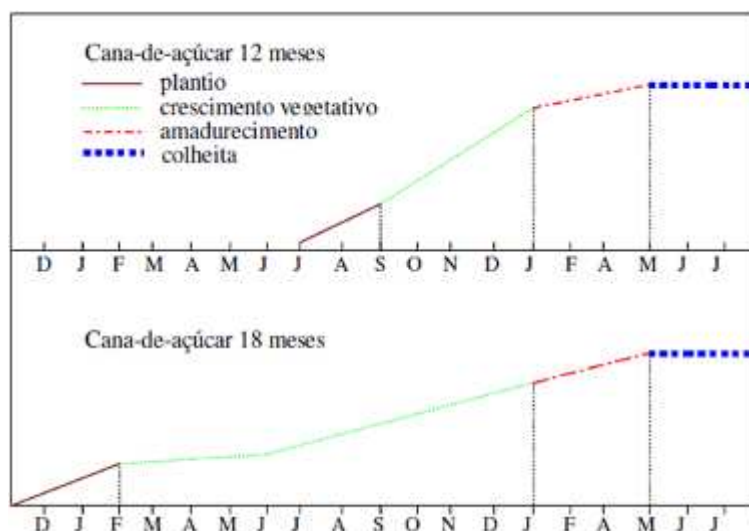


Figura 1- Crescimento da cultura da cana-de-açúcar

Fonte: SIMÕES (2004)

Segundo Seabra (2008) a cana-de-açúcar é constituída de *colmos* (concentração de sacarose), pontas e folhas (palha da cana) e pelo enraizamento, que fica na parte inferior ao solo. A Figura 2 apresenta as partes físicas constituintes da cana-de-açúcar.

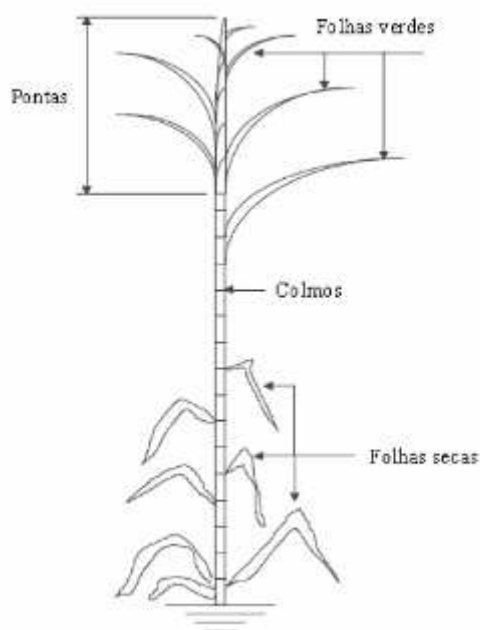


Figura 2 - Constituintes físicos da cana-de-açúcar

Fonte: SEABRA (2008)

Segundo Satolo (2008) a cana de açúcar tem aproveitamentos múltiplos, podendo ser submetidos a diversos processos industriais com certa versatilidade que resultam em vários subprodutos. A transformação da cana-de-açúcar em seus produtos tem início com a extração do caldo, se o caldo for destinado à produção de álcool, são realizadas a fermentação, destilação e a retificação, tendo como resultado o álcool hidratado, que pode ser desidratado e transformado em álcool anidro, ou adicionado produtos e transformado em bebidas, alimentos ou produtos farmacêuticos.

Satolo (2008) ainda cita que a sacarose é a matéria-prima do açúcar e álcool, seu teor é critério para determinação da qualidade da variedade de cana. Já a fibra (bagaço) é uma das grandes razões para a enorme competitividade dos produtos originários da cana, uma vez que o uso do bagaço como fonte alimentícia de caldeiras garante às usinas auto-suficiência energética.

2.2 Produção da Cana-de-Açúcar

Segundo Veiga Filho (1998), nos cinco continentes existe produção de cana-de-açúcar, embora o cultivo da cana no continente europeu tenha pequena expressão, Oceania tem contribuição de apenas 4% da produção mundial, tendo como país mais relevante a Austrália

com 90% da produção total do continente. A África com 7% da produção mundial, com destaque relevante a África do Sul e o Egito. O continente mais importante na produção de cana de açúcar é o asiático, com um número expressivo de 42,5% e 42% de participação na área e produção respectivamente, a Índia é responsável por 22% da produção. A América do Norte e Central representam 13% da produção. A América do Sul ocupa a segunda maior posição com 34% de produção, por sua vez o Brasil é o maior produtor mundial com 27%.

Segundo dados do ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento (2009) O Brasil lidera a produção de cana-de-açúcar como mostra a Figura 3:

	1990	1991	1992	1993	1994	1995	1996	1997	1998	1999	2000	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007
Brasil	263	261	271	245	292	304	317	332	345	334	328	346	364	396	415	423	457	514
Índia	226	241	254	228	230	276	281	278	262	296	299	296	297	287	234	237	281	356
China	63	73	79	69	66	70	71	83	87	78	69	78	92	92	91	88	100	106
Tailândia	34	41	47	40	38	51	58	56	47	50	54	50	60	74	65	50	48	64
México	40	38	42	43	41	44	45	45	49	47	44	47	46	47	49	52	51	51
MUNDO	1.053	1.089	1.116	1.031	1.090	1.172	1.223	1.252	1.258	1.267	1.253	1.261	1.331	1.376	1.336	1.317	1.389	1.558

Figura 3 - Principais países produtores de cana-de-açúcar

Fonte: (www.agricultura.gov.br)

No Brasil a prática de plantio da cana-de-açúcar está presente em todos os estados, sendo o Centro-Sul o maior produtor. A Companhia Nacional do Abastecimento (CONAB, 2011) fez um levantamento em praticamente todas as usinas, e constatou que a área de cana-de-açúcar colhida destinada à atividade sucroalcooleira, está estimada em 8.033,6 mil hectares, sendo o estado de São Paulo responsável pela maior produtividade, que chega a 54,23% (4.357,01 mil hectares), seguido por Minas Gerais com 8,1% (649,94 mil hectares), Paraná com 7,25% (582,32 mil hectares), Goiás com 7,46% (599,31 mil hectares), Alagoas com 5,46% (438,57 mil hectares), Mato Grosso do Sul com 4,93% (396,16 mil hectares) e Pernambuco com 4,32% (346,82 mil hectares). A CONAB (2011) ainda afirma que a previsão total de cana moída na safra 2010/11 seja de 624.991 mil toneladas, com incremento de 3,40% em relação à safra 2009/10, ou 20.477 mil toneladas a mais para moagem nesta safra. A Tabela 1 apresenta os números reais em toneladas estimados para a safra 2011.

Tabela 1 – Estimativa da produção de açúcar e etanol para a safra de 2011 no Brasil

(Em 1.000 toneladas)

REGIÃO/UF	INDÚSTRIA SUCROALCOOLEIRA		
	TOTAL	AÇÚCAR	ETANOL
NORTE	1.380,2	435,0	945,2
RO	146,5	-	146,5
AM	345,7	200,1	145,6
PA	540,0	234,9	305,1
TO	348,0	-	348,0
NORDESTE	62.909,8	37.335,9	25.573,9
MA	2.551,7	137,8	2.413,9
PI	836,9	364,1	472,8
CE	180,4	-	180,4
RN	2.994,2	1.832,5	1.161,7
PB	5.349,9	1.588,9	3.761,0
PE	18.783,8	13.486,8	5.297,0
AL	26.752,8	18.218,7	8.534,1
SE	2.200,9	550,2	1.650,7
BA	3.259,2	1.157,0	2.102,2
CENTRO-OESTE	96.149,1	28.033,0	68.116,1
MT	13.835,1	3.402,1	10.433,0
MS	34.333,2	11.364,3	22.968,9
GO	47.980,8	13.266,7	34.714,1
SUDESTE	420.561,1	199.395,4	221.165,7
MG	55.198,1	23.867,7	31.330,4
ES	3.484,0	801,3	2.682,7
RJ	2.643,5	1.467,1	1.176,4
SP	359.235,5	173.259,3	185.976,2
SUL	43.990,8	23.515,6	20.475,2
PR	43.905,2	23.515,6	20.389,6
RS	85,6	-	85,6
NORTE/NORDESTE	64.290,0	37.770,8	26.519,2
CENTRO-SUL	560.701,0	250.944,1	309.756,9
BRASIL	624.991,0	288.714,9	336.276,1

Fonte: CONAB (2011)

A produção total estimada é de 624.991,0 mil Toneladas, sendo deste montante 288.714,9 mil toneladas destinadas a produção de açúcar, enquanto o restante 336.276,1 para a produção de álcool. A Figura 4 mostra a evolução da produtividade da cana no Brasil.

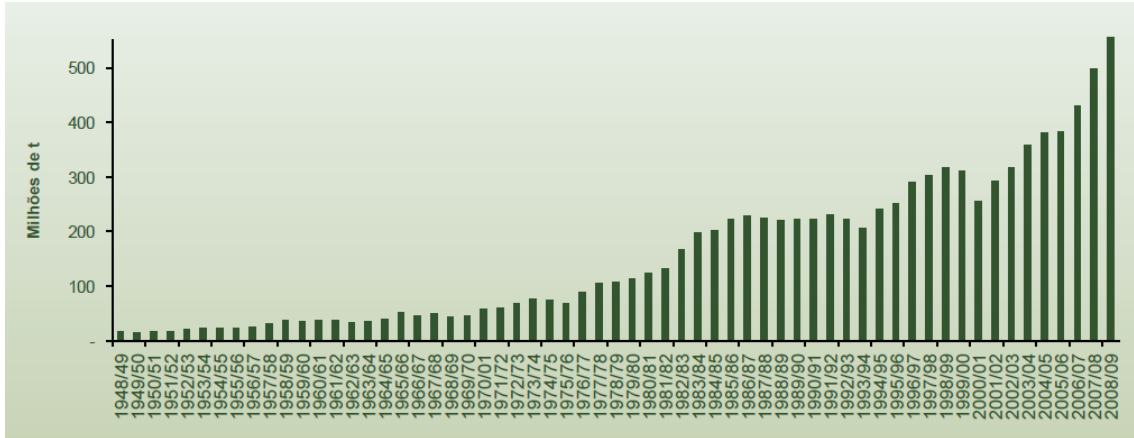


Figura 4 - Evolução da produtividade da cana-de-açúcar ao longo dos anos

Fonte: (www.agricultura.gov.br)

O Programa Nacional do Álcool (Proálcool) lançado em 1975 teve como objetivo diminuir a dependência brasileira do petróleo importado. Desenvolvendo grande contribuição tecnológica ao setor sucroalcooleiro, elevando a cana-de-açúcar e seus derivados a segunda principal fonte de energia primária da matriz energética nacional. Essa experiência tem conquistado o mundo, e o Brasil se tornou referência nessa área.

Uma necessidade cada vez maior no mercado mundial é a geração de energia a partir de fontes renováveis, e assim o mercado impulsiona cada vez mais a produção de álcool etanol a partir da cana-de-açúcar.

O Brasil, atualmente além de maior produtor mundial, passou a ser maior exportador mundial de açúcar. O Proálcool é o maior programa comercial de utilização de biomassa para a produção de energia no mundo, e é considerada a iniciativa mais bem sucedida no mundo na substituição de derivados de petróleo no setor automotivo, através do uso do álcool como combustível único nos veículos. Atualmente há cerca de 4 milhões de veículos utilizando exclusivamente esse derivado da cana como combustível, representando em torno de 40% da frota nacional. Ainda não se deve esquecer do importante papel desempenhado na solução do problema da octanagem da gasolina, substituindo o chumbo tetraetila, altamente prejudicial à saúde humana, na mistura gasolina-álcool, hoje aceita e usada em praticamente todo o mundo (DE PAULA et al, 2009).

2.3 Resíduos Gerados pela Cana-de-açúcar

Para a produção de álcool as usinas geram diversos tipos de resíduos, entre os resíduos a Companhia de Tecnologia de Saneamento Ambiental, (CETESB, 2002) destaca: água de lavagem da cana; água dos condensadores barométricos e água condensada nos evaporadores; bagaço; torta de filtro; vinhoto; água da lavagem das dornas; melaço; ponta de cana.

- A água de lavagem da cana tem origem da limpeza da cana, que é realizada com a finalidade de retirar todas as impurezas para que não ocorra perda de qualidade do caldo no processo de moagem. A água residuária possui alto teor de sacarose (principalmente no caso de despalha com fogo), possui ainda grande quantidade de matéria vegetal, terra e pedregulhos aderidos.
- Água dos condensadores barométricos e água condensada nos evaporadores são provenientes do caldo da cana, são gotículas de águas contendo açúcares.
- Bagaço é proveniente da moagem da cana para a extração do caldo, o resíduo é denominado de celulose, possui um teor de umidade, de 40 a 60%. Esse resíduo pode e muitas vezes é utilizado como matéria prima para co-geração de energia.
- Torta de filtro é gerada durante a filtração do lodo durante a clarificação, é composto por resíduos da calagem, um todo rico em fosfato.
- Água da lavagem das dornas é a água proveniente da lavagem dos recipientes utilizados para fermentação, para obtenção álcool (volume reduzido). O resíduo é muito semelhante ao vinhoto, porém mais diluído (cerca de 20 %).
- Melaço é gerado na fabricação do açúcar, e possui alta Demanda Bioquímica de Oxigênio (DBO) praticamente todo o melaço gerado é utilizado na produção do álcool, voltando à cadeia produtiva como co-produto.
- Ponta de cana gerado antes da moagem, é o corte de cana para moagem, muito utilizado na alimentação de animais, ou até mesmo nas caldeiras como combustível.
- Vinhoto tem origem na destilação do melaço fermentado para a produção de álcool, em suas características esta presente a alta taxa de DBO e Demanda Química de Oxigênio (DQO), tem como destino final a utilização como fertilizante.

2.4 Produção de CBC

As propriedades da CBC dependem principalmente das condições que ocorre a combustão do bagaço, as modificações no bagaço em relação à temperatura podem ser descritas: Inicialmente através da perda de massa, que ocorre em temperatura próxima aos 100° C resultando na evaporação da água; aproximadamente aos 350° C inicia-se a queima do bagaço da cana-de-açúcar; Entre 400 e 500° C o carbono residual é totalmente oxidado, essa perda de massa resulta numa cinza rica em sílica amorfa. O emprego de combustão entre 700° C a 800° C resulta em formação de quartzo e outras formas cristalinas; A forma e quantidade de sílica na cinza também são influenciadas pelo tempo, sendo que períodos de queima mais longos a temperaturas variando de 500 a 680 ° C (períodos próximos a 1 minuto) resultam em sílica totalmente amorfa (PAULA, 2006 apud COOK ET al, 1986).

Ainda o mesmo autor destaca que além de influenciar no grau de cristalinidade da sílica na cinza, as condições de queima também afeta a área de superfície específica das partículas, propriedade com estreita relação com a reatividade da cinza. Assim, variações nas condições de queima podem causar grandes modificações nos valores de área de superfície específica através da diminuição da microporosidade superficial das partículas, decorrente do colapso e coalescência da rede de poros.

A CBC é um resíduo utilizado pelas usinas como fertilizantes, através da disposição no solo de plantio da cana. Porém pode ser utilizado em atividades mais nobres do que a fertilização de lavouras, visto que sua composição é basicamente sílica e não possui propriedades específicas para esse fim. Por essas características e pelos estudos indicarem que esse resíduo tem possibilidade real de utilização como agregado na construção civil, substituindo à areia ou o cimento (LIMA, MORRETI e SANTOS, 2009).

A CBC tem sido estudada em diversas universidades brasileiras há algum tempo. Sua aplicação no concreto ou argamassas pode ser na forma natural, ou otimizada, com processos de controle de combustão do bagaço através de temperatura e tempo, e a moagem, tendo resultados superiores porém com custos excessivos se aplicados em larga escala.

Para combustão do bagaço e geração da cinza em laboratório, um pré-tratamento do bagaço da cana-de-açúcar evitaria a possível contaminação por quartzo. Diferentes procedimentos de queima podem ser empregados para a obtenção de cinza sem as fases cristalinas. De Paula (2006) em seus estudos com o processo de produção de CBC otimizados em laboratório através de combustão e moagem, encontrou índices de atividade pozolânica comprovando a

pozolanicidade da CBC, e mesmo com composição desapropriada a cinza utilizada na produção de argamassa manteve as propriedades básicas.

Cordeiro (2009) concluiu que a cinza produzida com queima controlada a 600 °C em forno resistivo e cominuída em moinho planetário apresenta atividade pozalânica adequada, atendendo aos requisitos propostos na NBR 12653/1992, propondo em seu estudo de caracterização de CBC para emprego como pozolana em materiais cimentícios. 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.

2.4.1 Estudo da Geração de Cinza na Usina Santa Terezinha.

Foi realizada visita em campo com a finalidade de entender e diagnosticar os processos da geração de cinzas provenientes da combustão do bagaço da cana-de-açúcar, onde, este trabalho busca uma solução para seu destino. O emprego das cinzas no concreto através da substituição parcial da CBC por agregado miúdo.

a) Empreendimento e localização

A Usina de Santa Terezinha está localizada em Iguatemi distrito de Maringá-PR, é uma indústria de açúcar e álcool, que em seus processos gera grande quantidade de bagaço, que é utilizado como combustível em caldeiras, visando à produção de vapor d'água para geração de energia elétrica.

A empresa é auto-suficiente em sua demanda térmica e eletromecânica, ou seja, toda a produção tem sua energia produzida na própria empresa. A indústria Santa Terezinha está inserida entre as principais empresas do setor sucro-alcooleiro, principalmente pela técnica e capacidade de geração de energia elétrica através de tecnologia alternativa.

Há disponibilidade de matéria prima para geração de excedente de energia. O excedente de energia pode ser comercializado, algumas novas tecnologias seriam necessárias para que a energia possa ser convertida e assim transmitida à rede de energia nacional.

A empresa conta com vários setores, conforme a Figura 5 demonstra:

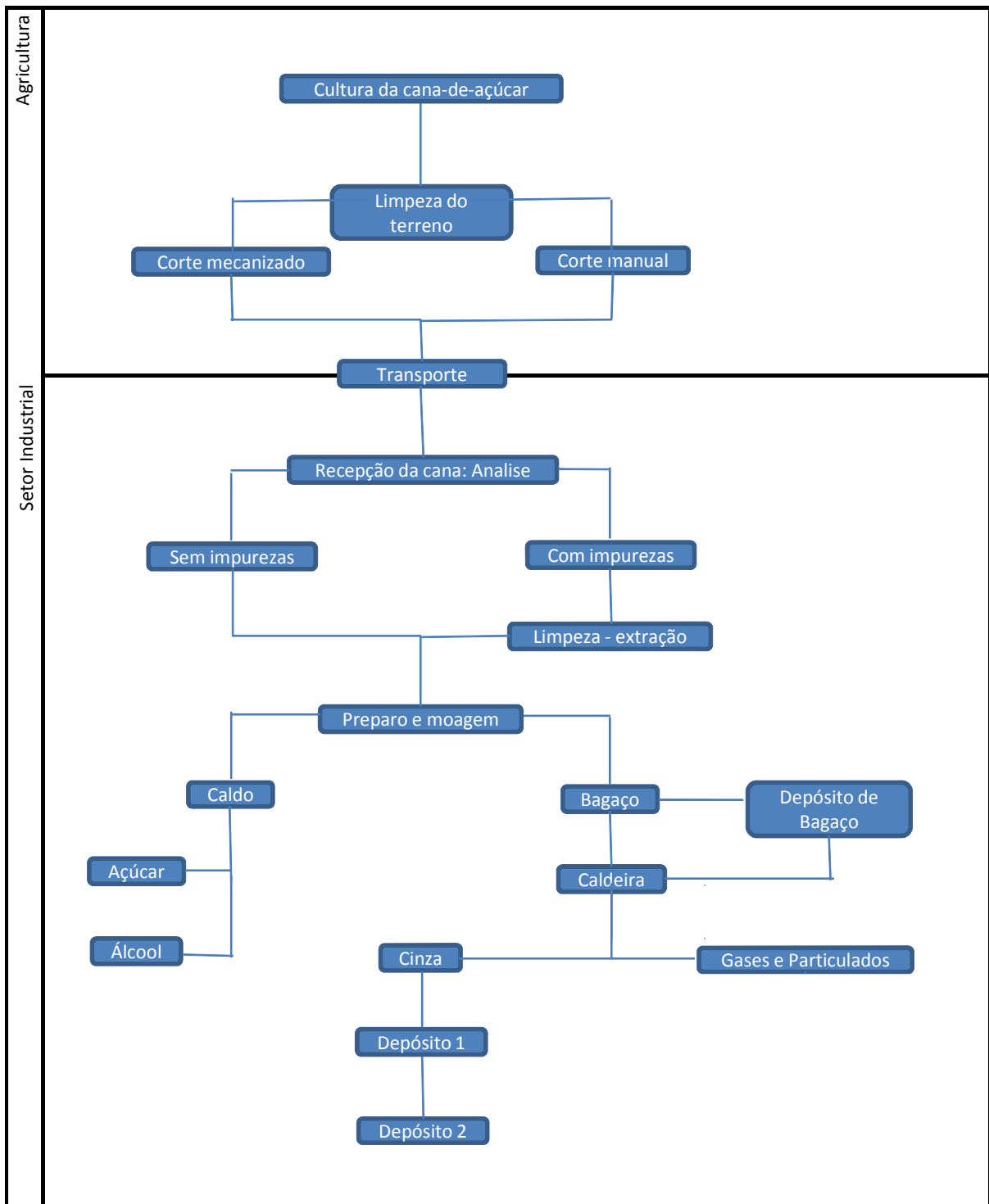


Figura 5 - Fluxograma de geração de cinza

b) Cultura da Cana-de-açúcar

A cana de açúcar produzida tem sua evolução de aproximadamente 12 meses conhecida como cana de ano, ou cana de 12 meses.

c) Colheita, Limpeza, Corte e Carregamento

A colheita da cana-de-açúcar engloba as etapas de limpeza (eliminação de pontas e folhas); corte e carregamento;

A Usina Santa Teresinha realiza o processo de limpeza na plantação com a queima das folhas e pontas da cana-de-açúcar, o que ocasiona diminuição da produtividade da cana, situação em que ocorre grande perda de sacarose, produto responsável pela produção de açúcar e álcool. Estas folhas e pontas poderiam ser aproveitadas, para a geração de energia, fazendo sua calcinação junto ao bagaço.

Os dois processos de colheita utilizam o sistema de queima para a limpeza. Os tipos são definidos como: (1) mecanizada; (2) manual;

No tipo (1) o corte é mecanizado e é realizado por colheitadeiras de cana picada. O produto desse tipo de corte possui comprimento pequeno, menores quantidades de colmos, e tem maior perda de sacarose do que tipo 2.

No tipo (2) o corte é manual e a cana é queimada. Em geral esse tipo de corte é mais eficiente devido à relação de sacarose, porém, a falta de mão-de-obra obriga a usina à mecanizar o processo. A queima nesse tipo de corte é justificada para segurança do responsável pelo corte, a queima diminui os riscos de acidentes de trabalho em virtude das folhas da cana, que são cortantes, e de insetos e animais peçonhentos que normalmente se abrigam no canavial.

d) Transporte

O transporte da cana é feito através de caminhões equipados com compartimentos de carga onde é disposta a cana, a cana colhida no tipo (1) apresenta um cargueiro fechado, com abertura apenas na região onde são coletadas as amostras de cana para análise.

A cana colhida no tipo (2) é transportada em caminhões com vãos no vagão de carga, a cana apresenta comprimento superior ao do corte mecanizado, assim seu transporte ocorre com menores perdas de material.

Os tipos de transporte são apresentados na Figura 6.



Figura 6 - Transporte da cana-de-açúcar

e) **Recepção da Cana**

A cana que chega à usina é submetida a pesagem, em seguida são retiradas amostras. A amostragem tem finalidade de obter três parâmetros: teor de sacarose; fibras presentes; quantidade de impurezas.

O teor de sacarose aparente e as porcentagens de sólidos solúveis são quem determinam a produtividade do caldo responsável pela produção do açúcar e álcool. As fibras presentes indicam a quantidade de bagaço que será gerado, quanto maior a quantidade de fibra da espécie, maior a quantidade de combustível para caldeira. A cana que possui concentração de impurezas maior que 10% (10 kg/ton partes) é encaminhada a lavagem.

A Figura 7 apresenta o cargueiro de cana com corte automatizado, onde tem a abertura para coleta de amostras.



Figura 7 - Cargueiro com abertura de coleta de dados

f) Lavagem

A cana que é encaminhada à lavagem com a finalidade de reduzir ao máximo a quantidade de impurezas que podem prejudicar o rendimento das etapas subsequentes. A água da limpeza da cana é utilizada e reutilizada através de um ciclo fechado. No caso da cana que possui corte automático (cana picada) ocorre perda de maior quantidade de sacarose na lavagem, então esta não deveria ser lavada. Porém, a usina adota a lavagem em todas as situações em que há mais de 10% de impurezas presentes. A Figura 8 apresenta o sistema de lavagem, no exato momento que ocorre a lavagem de cana com corte automatizado.



Figura 8 - Lavagem da cana-de-açúcar

g) Preparo e moagem

A cana é descarregada nas mesas que alimentam a linha de produção, etapa de preparo, em que é feita a desintegração parcial do colmo, para que facilite o processo de extração da sacarose, glicose e frutose, todos os açúcares utilizados na produção de álcool e açúcar, no qual apenas a sacarose pode ser usinada em açúcar. As operações básicas são corte, com o uso de facas rotativas, e desfibramento, resultando na destruição da estrutura original da cana. Na sequência é realizada a extração do caldo, rico em sacarose.

A extração do caldo é feita em moendas, a cana é moída seis vezes para que seja garantida a extração eficiente, o caldo é extraído por compressão da cana desfibrada por um conjunto de cilindros metálicos.

Toda a cana recebida é processada imediatamente, porque o armazenamento não é prática aconselhada, resultando em perda de sacarose.

A Figura 9 apresenta uma etapa do processo de desintegração da fibra para posterior extração do caldo.



Figura 9 - Trituração da cana-de-açúcar

h) Bagaço

Com a extração do caldo, ocorre a geração do resíduo (co-produto) bagaço da cana-de-açúcar, que possui boas características para o uso energético, como combustível. O bagaço possui dois destinos: combustão e depósito.

Quando utilizado para combustão, o bagaço é transportado através de esteiras até os alimentadores das caldeiras, onde o resíduo é disposto e queimado sem qualquer tratamento prévio, sua maior parte é consumido em suspensão, devido às altas temperaturas das caldeiras. O bagaço excedente é transportado e depositado, onde fica armazenado até que a demanda da caldeira por combustível aumente e o setor de preparo e moagem não a atenda, assim os dois setores alimentam a caldeira. Pode-se destacar que mesmo depois do atendimento das demandas de energia da usina, há sobra de bagaço, que é vendido para outras usinas.

A Figura 10 apresenta as fibras da cana ainda com o caldo, enquanto a Figura 11 apresenta o bagaço depois da extração do caldo.



Figura 10 - Bagaço úmido



Figura 11 - Bagaço seco

A Figura 12 apresenta a esteira de transporte do bagaço com o caldo já extraído, tem ligação até a alimentadora da caldeira.



Figura 12 – Esteira transportadora de bagaço

A Figura 13 mostra a esteira que alimenta a caldeira, essa esteira possui aberturas por onde o bagaço é injetado, através da gravidade.



Figura 13 - Alimentador de caldeira

A Figura 14 apresenta o conjunto depósito e alimentador. Quando há excedente de cana, esta é enviada ao depósito.



Figura 14 - Conjunto das esteiras responsável pelo transporte do bagaço

A Figura15 apresenta o bagaço da cana depositado, e o operador do trator que empilha o bagaço.



Figura 15 - Depósito de bagaço

A Figura 16 mostra as duas caldeiras que a empresa possui.



Figura 16 - Caldeiras

Figura 17 mostra a combustão do bagaço realizado por uma das caldeiras, nessa figura é evidenciado que parte do bagaço é queimado em suspensão.



Figura 17 - Combustão do bagaço

i) Geração da cinza

A combustão do bagaço nas caldeiras gera um resíduo secundário, a cinza, que é eliminada da caldeira de três formas: junto com os gases; gravidade em chicanas; e pelas grelhas basculantes.

A cinza gerada em suspensão é arrastada junto com os gases e lançada na atmosfera pelo sistema de exaustão e assim sendo distribuída ao redor da Usina. O sistema de exaustão conta com chicanas que dificultam a passagem de particulados, parte é retida através da gravidade e é retirada. A cinza retida na grelha basculante é aquela queimada na grelha e ou a decantada na caldeira.

A Figura 18 apresenta a eliminação da cinza retida nas chicanas, a Figura 19 apresenta a eliminação das cinzas junto com os gases.



Figura 18 - Eliminação da cinza retida no sistema de chicanas



Figura 19 - Eliminação da cinza junto com os gases

j) Depósitos de cinza

A Usina conta com dois depósitos de cinza, o depósito 1, responsável pela armazenagem temporária da cinza recém coletada por carrinhas e possui alta temperatura, tem finalidade de

armazenar pequenas quantidades de cinzas com altas temperaturas. Quando o depósito 1 encontra-se cheio o resíduo é encaminhado ao depósito 2 utilizando trator com pá carregadeira.

A cinza é encaminhada pra disposição no solo como corretivo, acredita-se que a cinza devido sua pequena granulometria dificulta a evapotranspiração, diminuindo a evaporação da água retida no solo.

A Figura 20 apresenta o depósito de cinza 1 e a Figura 21 o depósito de cinza 2.



Figura 20 - Depósito de cinzas 1



Figura 21 - Depósito de cinzas 2

2.5 Estudos Utilizando CBC no Concreto ou Argamassas

Estudos com CBC têm sido realizados devido a possibilidade de redução dos problemas ambientais. Esses estudos tem sido desenvolvidos com a possibilidade de substituição do cimento ou como adições na fabricação de concretos e argamassas.

Singh et al. (2000) evidenciaram em seu estudo realizado na Índia a potencialidade pozolânica da CBC. A argamassa contendo 10% de CBC apresentou resistência mecânica aos 7, 14 e 28 dias superior a da argamassa de referência.

Segundo Nunes (2009) a CBC tem sido estudada no Brasil há alguns anos, sua aplicação como pozolana pode ser na forma natural, passar por um tratamento prévio ou até mesmo ser produzida sob controle de temperatura e tempo, passando posteriormente por uma moagem.

A utilização de CBC no concreto reduz a extração de recursos naturais como argila e calcário dispensam o elevado montante de gases emitidos para a atmosfera que é gerada no processo de fabricação de cimento Portland. az

Dantas et al (2009) utilizou da adição de CBC em substituição ao cimento na produção de concretos auto-adensáveis sendo denominado T1, e em substituição a areia denominado T2, ambos com substituição de 20%, tendo resultados em que o concreto com substituição do cimento T1 obteve melhores características auto-compactantes que os demais traços; TR traço

de referência sem cinza e T2 traço com substituição de areia. O autor ainda defende que estes fatos estão relacionados com a maior superfície específica da cinza em relação ao cimento e a areia, justifica que a CBC em substituição à areia torna o concreto menos viscoso, uma vez que a cinza possui granulometria inferior. Afirma ainda que os resultados referentes ao comportamento do concreto no estado fluido indicam que todos os traços atendem aos requisitos para o concreto auto-adensável.

Nunes (2009) aponta para a viabilidade do uso da cinza em conjunto com o cimento Portland, utilizou em sua pesquisa cinza residual coletada na Unidade Santa Terezinha, localizada no Distrito de Iguatemi - PR, para a confecção de corpos cilíndricos 10 x 20 cm, a cinza estudada é produzida em fornos sem controle de temperatura, ou seja, as cinzas são formadas por combustão não controlada. Os resultados indicaram que a substituição de cimentos por cinzas proporcionou aumento da resistência à compressão em índice de substituição até 13% sendo que as maiores resistências ocorreram com taxa de 7% de CBC.

De Paula (2006) realizou substituição parcial do cimento, com cinza proveniente de combustão otimizada em laboratório com tempo de 6 horas a 600°C, os ensaios de compressão das argamassas com teores de CBC entre 0 e 30%, aos 7 e 28 dias, indicaram a possibilidade de substituição de até 20% do cimento pela CBC, sem prejuízo da resistência. A adição de valores mais elevados de cinza demonstra resultados com resistências menores, De Paula (2006) salienta a possibilidade de utilização com fins menos nobres, casos em que a argamassa não exija uma resistência elevada.

De acordo com os resultados obtidos por Freitas (2005), foi possível confirmar a potencialidade do uso da cinza do bagaço da cana-de-açúcar (CBC) em substituição parcial ao cimento Portland na produção de argamassas, para o emprego desta CBC os estudos realizados incluíram otimização da queima da cinza e moagem da cinza. O autor destaca a necessidade de controle da queima na usina.

Lima et al (2009) constataram que a cinza do bagaço da cana-de-açúcar em substituição ao agregado miúdo apresenta resultados satisfatórios em relação a resistência a compressão, devido as propriedades físicas (massa específica, massa unitária e granulometria) semelhantes as da areia natural. E ainda as amostras confeccionadas com substituição de 20 e 30% alcançaram respectivamente 28% e 34% de resistência à compressão dos corpos-de-prova acima do exemplar de referência, na idade de 28 dias, a utilização do teor de 50% também apresentou resultado satisfatório, com valor 32% acima do exemplar de referência, a situação em que isto não ocorreu foi à substituição de 100%, tendo grande perda de resistência. O autor ainda acrescenta que o uso de CBC não provocou o aumento da retração por secagem

nas amostras de argamassa, aos 56 dias, o uso de CBC como agregado miúdo é viável em argamassas, desde que também seja investigada a durabilidade dos materiais para que se possam estabelecer melhores parâmetros de utilização.

2.5.1 Estudos Utilizando CBC proveniente da Usina Santa Terezinha

2.5.1.1 Estudo das Características Físicas e Química da CBC - NUNES (2009)

Nunes (2009) estudou as características físicas e químicas da cinza do bagaço de cana-de-açúcar para uso na construção civil, e também estudou a substituição do cimento CII-F 32 por CBC com granulometria passada na peneira com abertura 0,6 mm. Em relação ao traço de referência com as substituições de 3%, 5%, 7%, 10%, 13%, 15% e 20%. Os corpos-de-prova utilizados na pesquisa foram cilíndricos de 10 cm x 20 cm, e os ensaios realizados foram de compressão axial nas idades: 3, 7, 14 e 28 dias. A quantidade máxima para substituição de cimento por CBC adotada foi de 20%, a taxa máxima foi escolhida devido a uma expectativa e tendência que a partir de 15% de substituição ocorreria uma queda de resistência, aliado ao curto tempo disponível para a pesquisa.

Os valores experimentais obtidos nos ensaios de resistência à compressão dos corpos-de-prova estão apresentados na Tabela 2:

Tabela 2 - Resistência à compressão obtidos por Nunes (2009)

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

Fonte: NUNES (2009)

De acordo com os resultados obtidos, nota-se que a resistência à compressão aos 28 dias de cura teve acréscimo de 0,6% a 8% ao substituir até 7% da massa de cimento por CBC.

Percebe-se também que os maiores acréscimos na resistência à compressão ocorreram após 3 dias de cura para a substituição de 5% e 15% da massa de cimento por CBC, a partir da substituição de 15% ocorreu um decréscimo na resistência, após os 14 dias de cura, comparada com o traço de referência.

Nunes (2009) defende que a cinza do bagaço da cana-de-açúcar apresenta alta concentração de materiais cristalinos na forma de quartzo e possui baixa área superficial. Assim como a CBC possui baixa atividade pozolânica no estado natural, o seu emprego é indicado como enchimento em compósitos a base de cimento Portland curados ao ar.

A substituição de até 13% de cimento por CBC produziu um ganho considerável na resistência à compressão, sendo a taxa de 7% a que proporcionou a maior resistência. Acima desses valores houve uma queda na resistência do concreto após 28 dias. O ganho de resistência nas primeiras idades também foi relevante, pode ser explicado devido ao preenchimento do espaço entre as partículas grossas por partículas finas.

2.5.1.2 Diagramas de Dosagem para Concretos com a Utilização da CBC como Adição Mineral - SECCHI (2010)

Secchi (2010) realizou um trabalho buscando a alternativa de utilizar CBC na construção civil como adição de concreto, elaborando diagramas de dosagens, com a finalidade de obter o menor consumo de cimento (CPV-ARI) e areia com as mesmas propriedades de concretos convencionais.

A partir do traço padrão, dentro das séries normal, rica e pobre, foram feitas substituições, em massa, de areia por CBC com granulometria passada na peneira com abertura 0,6 mm, nas taxas de: 10%, 15%, 20% e 30%. Para cada traço desenvolvido, fez-se a concretagem e moldagem dos corpos de prova (CP), com posterior cura, e se determinou: a resistência à compressão, o fator água/cimento e o consumo de cimento. Com todos os dados, desenvolveram-se os diagramas de dosagens que correlacionaram todas estas variáveis.

Os resultados da pesquisa de Secchi (2010) apontaram para um aumento na resistência à compressão dos concretos contendo CBC em substituição parcial da areia, sendo esta observação justificada pela hipótese de que a CBC atua na mistura do concreto como um filler. Os ensaios de compressão axial foram feitos segundo a NBR 5739.

Os diagramas de dosagens foram montados obedecendo-se as três leis comportamentais do concreto plástico: Lei de Abrams; Lei de Lyse e Lei de Molinari.

Os resultados obtidos dos ensaios de resistência a compressão estão apresentados nas Tabelas 3 e 4. As tabelas trazem a variação da resistência ($\Delta\%$) comparadas ao traço de referência (0% de CBC).

Tabela 3 - Média das resistências em função da idade e teor de CBC, abatimento 60mm

SÉRIE	CBC (%)	f_c					
		3 DIAS		7 DIAS		28 DIAS	
		MPa	$\Delta\%$	MPa	$\Delta\%$	MPa	$\Delta\%$
Rica	0 (Ref.)	33,9	0,0	38,0	0,0	40,8	0,0
	10	36,6	7,7	40,4	6,3	43,4	6,4
	15	38,9	14,8	43,1	13,4	50,4	23,6
	20	37,8	11,7	38,6	1,6	45,3	11,0
	30	33,7	-0,5	35,8	-5,9	43,2	5,8
Normal	0 (Ref.)	23,3	0,0	27,1	0,0	33,9	0,0
	10	27,9	19,6	31,5	16,0	35,0	3,3
	15	29,7	27,1	32,0	17,8	38,0	11,9
	20	28,8	23,4	30,6	12,8	32,8	-3,4
	30	20,4	-12,4	24,1	-11,2	30,7	-9,4
Pobre	0 (Ref.)	17,7	0,0	23,9	0,0	25,7	0,0
	10	19,8	12,0	23,1	-3,6	27,7	7,7
	15	22,3	26,0	26,1	9,1	29,5	14,8
	20	21,5	21,5	22,2	-7,2	26,0	1,0
	30	17,7	0,0	20,1	-15,8	24,8	-3,6

Nota: $\Delta\% = [f_c \text{ (com CBC)} \times 100 / f_c \text{ (Ref.)}] - 100$

Fonte: SECCHI (2010)

Fazendo uma análise dos resultados obtidos por Secchi (2010), observam-se acréscimos nas resistências quando utilizados teores de até 15% de CBC, para todas as séries e idades. O teor de 20% teve pequena queda em uma idade, o teor que apresentou maior queda em todas as idades foi o de 30%. Sendo observado ganhos de resistências mais acentuados, na comparação com a referência na idade de 3 dias, para as 3 séries. A serie normal com 15% de CBC e 28 dias de idade obteve uma resistência de 38,0 MPa, aumento de 4,1 MPa em relação ao corpo-de-prova de referência.

Tabela 4 - Média das resistências em função da idade e teor de CBC, abatimento 90mm

SÉRIE	CBC (%)	f_c					
		3 DIAS		7 DIAS		28 DIAS	
		MPa	$\Delta\%$	MPa	$\Delta\%$	MPa	$\Delta\%$
Rica	0	30,7	+0,0	34,4	+0,0	36,6	+0,0
	10	33,0	+7,5	37,9	+10,1	39,9	+8,9
	15	36,0	+17,2	38,1	+10,8	45,2	+23,7
	20	32,4	+5,3	35,5	+3,0	41,0	+12,0
	30	29,1	-5,3	31,3	-9,1	38,9	+6,3
Normal	0	21,4	+0,0	24,2	+0,0	29,1	+0,0
	10	23,6	+10,2	28,8	+19,3	31,3	+7,5
	15	24,6	+15,0	29,7	+23,1	34,3	+17,8
	20	24,1	+12,8	27,4	+13,6	29,1	-0,1
	30	17,5	-18,4	21,2	-12,2	27,3	-6,4
Pobre	0	13,9	+0,0	18,6	+0,0	21,1	+0,0
	10	18,2	+31,5	20,8	+11,9	24,6	+16,6
	15	19,3	+39,0	22,6	+21,3	26,6	+26,2
	20	18,3	+32,1	20,8	+11,6	22,8	+8,5
	30	13,1	-5,7	17,7	-5,0	21,7	+3,3

Nota: $\Delta\% = [f_c \text{ (com CBC)} \times 100 / f_c \text{ (Ref.)}] - 100$

Fonte: SECCHI (2010)

Quanto ao teor de 20% houve acréscimos nas resistências em todas as séries e idades. O autor defende que o maior acréscimo nas resistências foi a de teor de até 15% em todas as idades. O teor de 30% apresentou queda de resistência como é evidenciado na tabela 6. O teor de 15% da série normal aos 28 dias obteve resistência de 34,3 MPa.

Os ganhos mais acentuados, na comparação com a referência, foram obtidos nas idades de 3 dias, na série pobre em ambos os ensaios.

Ao se analisar a resistência, percebe-se que até o teor de 20% de CBC ocorreram acréscimos, e que o teor de 15% obteve o melhor resultado tanto nas primeiras idades como aos 28 dias, em ambos os abatimentos. No teor de 30% verificou-se queda na resistência.

2.5.1.3 Desenvolvimento de Concretos de Alta Resistência Utilizando a CBC como Adição Mineral - ABE (2010)

Abe (2010) desenvolveu uma pesquisa para produção de concretos de alta resistência utilizando a cinza do bagaço da cana-de-açúcar como adição mineral com substituição parcial do agregado miúdo (areia) por CBC, nessa pesquisa desejava-se atingir resistências superiores a 50 MPa, avaliando a possibilidade de sua utilização na produção de concretos de alta resistência. Para a confecção do concreto foi substituído a areia por CBC nas taxas de 0%, 10%, 15%, 20% e 30%. Usou-se como materiais o cimento Portland CPV-ARI, areia de origem quartzosa, pedra britada de origem basáltica, CBC passante na peneira de abertura 0,6mm, conforme ABNT, bem como, sílica ativa e superplastificante de última geração.

O ensaio de resistência à compressão foi realizado de acordo com a NBR 5739:2007. Para cada traço confeccionado foram rompidos 9 CP's, sendo 3 CP's por idade e feito uma média aritmética dos valores para se obter a resistência. Os resultados estão apresentados na Tabela 5.

Tabela 5 - Resultados da resistência a compressão de Abe (2010)

RELAÇÃO AREIA x CBC	TRAÇO	SLUMP (cm)	a/c	Y CONCRETO (kg/m ³)	RESISTÊNCIAS (MPa)			CONSUMO CIMENTO (kg/m ³)
					3 dias	7 dias	28 dias	
70/30	RICO	9,0	0,27	2500,73	55,64	57,67	62,46	529,87
	NORMAL	9,0	0,36	2536,79	44,77	55,64	59,30	391,99
	POBRE	7,0	0,46	2470,00	40,59	43,46	56,45	315,84
80/20	RICO	9,0	0,27	2536,79	47,53	57,55	63,25	537,68
	NORMAL	8,0	0,34	2486,03	45,11	54,22	60,93	385,13
	POBRE	4,5	0,46	2413,90	38,46	48,72	52,20	308,74
85/15	RICO	9,0	0,27	2518,09	44,08	60,93	68,67	533,80
	NORMAL	7,5	0,36	2499,39	42,89	55,52	62,88	386,19
	POBRE	6,5	0,46	2411,22	37,44	51,85	58,98	308,30
90/10	RICO	8,5	0,27	2514,08	43,59	67,34	72,21	532,95
	NORMAL	7,5	0,34	2482,02	40,59	65,20	69,28	384,63
	POBRE	8,5	0,46	2415,23	35,20	59,79	63,41	308,82
100/0	RICO	8,5	0,27	2528,78	59,95	64,19	66,43	536,80
	NORMAL	4,5	0,38	2452,64	46,07	55,84	65,69	378,08
	POBRE	8,0	0,45	2367,14	40,66	49,33	61,01	303,14

Fonte: ABE (2010)

A série com melhor resultado nas resistências, tendo como referência o traço com 0% de CBC, foi a com teor de 10% de CBC.

2.5.1.4 Avaliação do Desempenho da CBC na Produção de Concretos - SOUTO (2010)

Souto (2010) investigou a viabilidade técnica da utilização de CBC em substituição de até 30% da massa de agregado miúdo (areia) em concretos de cimento Portland classe 30, com avaliação das propriedades mecânicas do concreto, compreendendo os ensaios de resistência à compressão axial, determinação do módulo de elasticidade e resistência à tração através de compressão diametral do corpo-de-prova, e ainda a avaliação, em escala laboratorial, da interferência da CBC no índice de vazios existente no concreto em estado endurecido. Os resultados da resistência à compressão obtido entre as amostras aos 3, 7 e 28 dias bem como a taxa de crescimento das resistências (Tx. cresc.) observadas no período entre as idades de 07 e 28 dias constam na Tabela 6.

Tabela 6 – Resistência à compressão axial do concreto obtido por Souto (2010)

Traço	03 dias	07 dias	28 dias
-------	---------	---------	---------

LP	23,92	27,77	35,74
CB05	26,01	29,92	37,59
CB10	25,71	31,02	39,67
CB15	25,86	33,68	39,96
CB20	24,28	33,58	39,15
CB25	21,17	26,14	32,75
CB30	23,36	25,93	31,14

Fonte: SOUTO (2010)

Os resultados obtidos por Souto (2010) com adições entre 5 e 20% promoveram acréscimo nos valores obtidos nos ensaios de resistência a compressão axial quando comparados com o corpo de prova padrão (LP), o teor de 15% de CBC apresentou o maior ganho de resistência, 11,81%. Enquanto os teores com adições de 25 e 30% apresentaram pequeno decréscimo da resistência.

Os resultados referentes aos módulos de elasticidade obtidos por Souto (2010) estão apresentados na Tabela 7.

Tabela 7 - Módulo de deformação obtido por Souto (2010)

Lote	Ruptura prevista (MPa)	Deformação em 30% da ruptura prevista	Deformação em 0,5 MPa (%)	Módulo de elasticidade (GPa)
LP	34	-0,156	-0,185	30,9
CB05	36	-0,771	-0,803	31,3
CB10	39	-0,807	-0,835	33,1
CB15	39	-0,759	-0,813	34,2
CB20	37	-0,782	-0,813	32,1
CB25	34	-0,775	-0,807	30,7
CB30	33	-0,884	-0,832	30,9

Fonte: SOUTO (2010)

Na tabela 8 constam os resultados de resistência a tração por compressão diametral obtidos por Souto (2010).

Tabela 8 - Resistência a tração por compressão diametral obtido por Souto (2010)

Lote	Resistência a tração - diametral (MPa)	Relação compressão / tração
LP	2,61	13,64
CB05	2,02	18,61
CB10	2,34	16,95
CB15	3,01	13,27
CB20	3,22	12,16
CB25	2,13	15,38
CB30	1,92	16,22

Fonte: SOUTO (2010)

Souto (2010) defende que associando a resistência à compressão axial do concreto, o fator a/c empregado e a resistência à tração por compressão diametral, pode-se sugerir que a CBC estudada demonstrou reagir, em pequena intensidade, com o hidróxido de cálcio proveniente da hidratação do cimento Portland o que lhe dá características comuns aos materiais pozolânicos com baixo IAP (índice de atividade pozolânica). Porém, Nunes (2009) evidenciou em seu trabalho que os índices de atividade pozolânicas na CBC ficaram abaixo da Norma.

Contudo, a adição da CBC, em determinados teores, gerou acréscimos na resistência à compressão axial do concreto, proporcionando o emprego da cinza para o aumento da resistência à compressão do concreto com fator a/c acima do empregado na amostra de referência, a cinza de bagaço de cana-de-açúcar pode ser empregada com o intuito de reduzir o consumo de cimento para uma mesma resistência.

2.6.1 Carbonatação

O concreto tem duas finalidades para a proteção do aço: a proteção física, que isola o aço do contato com o meio externo; e a outra é uma proteção química, dado através da formação de uma película passivadora que promove ao metal tal proteção.

É um agente agressivo em edificações, o gás carbônico presente na atmosfera, ele penetra no concreto e causa despassivação da camada protetora, deixando a armadura vulnerável à corrosão, principalmente em concretos que possuem elevada porosidade e permeabilidade, isso porque o gás carbônico reage com os compostos da pasta de cimento reduzindo a alcalinidade do material (RIBEIRO, PELISSER, GLEIZE, 2009).

A carbonatação pode ser definida como a ação natural do CO_2 nas estruturas de concreto, na qual o gás carbônico reage com o hidróxido de cálcio e/ou com o hidróxido de potássio, em presença de água, ocasionando a diminuição do pH da solução contida nos poros do concreto. A penetração de CO_2 no concreto e sua transformação em ácido na água dos poros faz com que o valor do pH da solução aquosa ali contida seja alterado, de 12,5 para um pH em torno de 8,5, e assim causando destruição da camada passivante ocasionando condições para que a corrosão da armadura ocorra. A Figura 22 apresenta um esquema com área despassivada e não despassivada (HELENE, 1993).

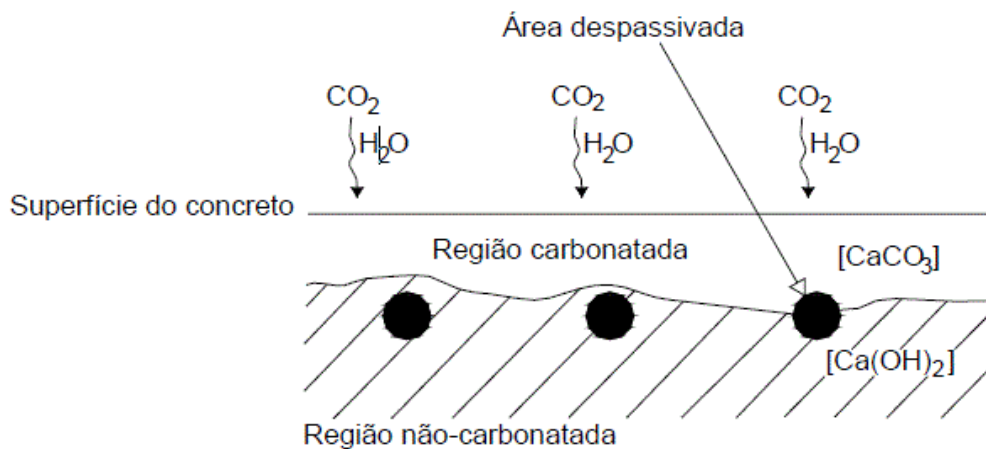


Figura 22 - Representação esquemática do processo de carbonatação

Fonte: RICHARDSON (1988, apud SILVA, 2007)

Hoppe (2005) afirma que a carbonatação é caracterizada pela formação de uma frente de avanço no processo, amplamente conhecida como “frente de carbonatação”, que separa duas zonas com pH diferentes, uma com $\text{pH} > 12$ e outra com $\text{pH} < 9$. O período de iniciação desse processo corresponde ao tempo que leva a frente de carbonatação chegar até a armadura e, quando isso ocorre, a camada de passivação que envolve a armadura fica desestabilizada devido ao pH baixo, típico de um concreto carbonatado.

A carbonatação forma no interior do concreto três zonas distintas de pH: zona completamente carbonatada; parcialmente carbonatada; e zona não carbonatada. Na zona totalmente carbonatada o pH é inferior a 9,0. Na zona parcialmente carbonatada o pH se apresenta na faixa de 9,0 e 11,5 com índice menor de carbonatação. E na zona não carbonatada o pH é 11,5 (HOPPE, 2008).

Alguns efeitos positivos da carbonatação são evidenciados, entre eles a diminuição da porosidade, devido ao resultado da carbonatação, o carbonato de cálcio (CaCO_3) ocupa um volume maior que o hidróxido de cálcio ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) o qual ele substitui. Além da liberação da

água do hidróxido de cálcio (Ca(OH)_2) que se em contato com partículas de cimento que ficaram sem hidratação, podem levar a hidratação delas, resultando em maior dureza superficial, menor permeabilidade superficial, menor movimentação de umidade, aumentando a resistência às formas de ataque controladas pela permeabilidade do concreto. (NEVILLE 1997).

Definindo carbonatação como a reação entre os produtos hidratados do cimento, principalmente o Ca(OH)_2 e o CO_2 presente na atmosfera, formando carbonato de cálcio e água, tem se a Equação 1.



Diversos pesquisadores vêm desenvolvendo processos e metodologias a fim de estudar o comportamento do concreto em relação a carbonatação, porém algumas dificuldades são encontradas, a maior delas está relacionada a falta de padronização do experimento, assim pesquisas não podem ser comparadas, até mesmo pesquisas utilizando mesmos materiais trazem resultados diferentes, mostrando a necessidade de mais pesquisas nessa área e o desenvolvimento de uma metodologia padrão.

A carbonatação é um processo que ocorre naturalmente, porém em é intensificado através de agentes antropicos. Segundo Gasparim (2007), estudar a carbonatação é interessante para a análise de concretos aplicados a situações onde ocorre grande incidência de dióxido de carbono, como túneis rodoviários, túneis metroviários. Estacionamentos no subsolo ou em ambientes fechados também sofrem com essa alta incidência de dióxido de carbono. A necessidade fez com que vários autores estudassem formas de carbonatar o concreto de maneira acelerada, em períodos curtos e obtivessem resultados de anos.

A carbonatação é estuda em todo o país, Paulleti, Possan e Dal Molin (2007) citam que as regiões Sul, Sudeste e Centro-Oeste, são onde estão concentrados os maiores grupos de pesquisa na área. A Tabela 9 apresenta alguns trabalhos acadêmicos sobre carbonatação:

Tabela 9 - Características dos estudos de carbonatação realizados por diversos pesquisadores

C	Ano	Tipo Material	Forma/dim amostra (mm)	Tipo e tempo de cura (dias)	Pré-condicionamento Tempo/local	UR (%)	T(°C)	CO2 (%)
Wolf e Dal Molin	1989	argamassa	cilindros 50x100	submersa 7 úmida	-	30, 50, 70 e 90	-	-
Wolf	1991	argamassa	cilindros 50x100	úmida 28	A etapa de sazonalamento não foi realizada. Depois da cura, as amostras seguiram direto para o ensaio de carbonatação.	-	-	-
Nepomuceno	1992	concreto	prismas 20x55x80	úmida/ao ar 1, 7 e 28	70 dias laboratório	entre 50 e 70	20	100
Bauer	1995	argamassa	cilindros 50x100	úmida 63	15 dias estufa a 50 °C, depois lab. cte massa	entre 65 e 70	-	50
John	1995	argamassa	prismas 20x55x80	-	-	-	21,5	5
Isaia	1995	concreto	cilindros 50x100	úmida 7	28 dias laboratório	-	-	10
Kazmierczak	1995	argamassa	prismas 20x55x80	submersa 7	câmara sazonal.	-	-	100
Monteiro	1996	argamassa	prismas 60x80x25	úmida 7 e 28	15 dias laboratório	entre 50 e 70	24	100
Sierra	1996	concreto	cilindros 100x200	submersa 7 dias	-	maior que 80	24	5
Lopes	1999	concreto	cilindros 100x200	úmida 7 e 28	22 e 43 laboratório	55	27	100
Seidler	1999	argamassa	prismas 40x40x160	úmida 28	7 dias câmara sazonal.	68	21	5
Vaghetti	1999	concreto	cilindros 100x100	úmida 7	21 e 84 laboratório	entre 50 e 80	23	10
Alves	2000	concreto	cilindros 100x70	úmida 7	21 dias laboratório	80	24	5
Cunha e Helene	2001	concreto	prismas 279x152x114	úmida 28	35 dias laboratório	entre 60 e 70	26	100

(Continua...)

Pesquisador	Ano	Tipo Material	Forma/dim amostra (mm)	Tipo e tempo de cura	Pré-condicionamento tempo/local	UR(%)	T(°C)	CO2 (%)
Coelho et al	2002	concreto	cilindros 100x200	úmida 28	35 dias laboratório	entre 60 e 70	26	100
Silva	2002	concreto argamassa	cilindros 50x100	úmida 7	-	60	25	100
Medeiros	2002	argamassa	prismas 60x60x120	úmida 3	25 dias seca - UR 50%	65	24	5
Venquiaruto	2002	concreto	cilindros 100x70	úmida 7	35 dias laboratório	75	23	5
Vieira	2003	concreto	100x100x60	úmida 28	7 dias estufa (50 °C), 14 dias em sala clim.	70	25	≥50
Kirchheim	2003	concreto	prismas 60x60x180	úmida 28	até constância câmara sazón.	70	25	100
Abreu	2004	concreto	prismas 100x100x60	úmida 28	32 dias câmara sazón.	70	25	5 e ≥50
Pauletti	2004	argamassa	prismas 40x40x160	submersa 7 e 28	sala clim. Massa cte. + mín.14 d redistribr.	70	20	6 e ≥60
Bourguignon	2004	concreto	cilindros 100x200	úmida 15	49 dias seca - UR 50%	65	26	95±5
Capuzzo	2007	concreto	100x200	Úmida 7	21 laboratório	65±5	-	50
Cadore	2007	concreto	100x200	Ambiental 91e 300	-	75±2	22±2	5
Moura	2007	concreto	100x100x150	Úmida 7	21 laboratório	-	23±2	20
Vaghetti	2007	concreto	75x75x50	Úmida 49	42 laboratório	75±2	20±1	10
Moreira	2008	argamassa	100x100	Úmida 28	21, 14 e 28 laboratório	75	23	5
Vieira	2009	concreto	80x80x80	Úmida 7	-	-	-	-
Ribeiro	2009	concreto	100x200 40x40x160	Úmida 28	-	85±5	25±2	6
Cavalcanti Filho	2009	concreto		Úmida 7 e 28	-	-	-	5

(Continua...)

Pesquisador	Ano	Tipo Material	Forma/dim amostra (mm)	Tipo e tempo de cura	Pré-condicionamento tempo/local	UR(%)	T(°C)	CO2 (%)
Pauletti	2004	argamassa	40x40x160	Submersa 28	-	70±10	20±1	0,088 e 6

Fonte: Adaptado e atualizado de PAULETTI, POSSAN E DAL MOLIN (2007)

Abreu (2004) concluiu em sua pesquisa que os efeitos da cinza volante utilizada em seu experimento obtiveram efeito significativo na profundidade carbonatada, além de outras interações, entre elas: relação água/cimento; teor de cinza volante; tipo de cimento; concentração de CO₂. A carbonatação teve resultados crescentes com o incremento do teor de cinza volante incorporado (substituindo o cimento) no concreto.

Hoppe (2008) concluiu que concreto com incorporação (substituição ao cimento) por cinza da casca de arroz (CCA) tanto na forma moída como na forma in natura apresenta carbonatação superior ao concreto de referência para as mesmas relações água/cimento. Em geral, os coeficientes de carbonatação apresentaram valores superiores para as amostras contendo CCA NATURAL em comparação às amostras contendo CCA MOÍDA.

Pauletti, Possan e Dal Molin (2007) afirma que argamassas produzidas com cimento substituído por concentrações de cinza volante tem profundidades de carbonatação cerca de 57% maiores que aquelas feitas com o cimento sem adições. E esse fator deve ser levado em consideração na realização da carbonatação acelerada.

Os concretos com substituições de cimento (clínquer) por adições tem menos Ca(OH)₂ e este ainda é utilizado para reações pozolânicas. No entanto, isso não quer dizer que necessariamente os concretos com adições pozolânicas são piores que os demais.

Hoppe (2008) destaca que os fatores que influenciam a carbonatação acelerada são: (1) grau de saturação dos poros; (2) teor de umidade; (3) concentração de CO₂; (4) tipo de cimento; (5) teor de adição mineral empregado; (6) temperatura e (7) agressividade ambiental.

2.6.1.1 Fatores que Influenciam a Carbonatação

A carbonatação é influenciada por várias características do concreto e do meio ambiente, algumas variáveis que interferem no concreto são elas: relação a/c, tipo de cura, pré-condicionamento, umidade, temperatura e concentração de CO₂.

Vieira e Marques (2009) constataram que concretos mais porosos possuem profundidades de carbonatação mais acentuadas, isso devido à maior facilidade que o CO₂ tem de

movimentação no concreto, nesse sentido, nota-se que os concretos de menor relação a/c, dificultam o acesso de CO_2 em função da sua menor porosidade.

Ribeiro, Pelisser e Gleize (2009) em seu estudo concluíram que a profundidade média de carbonatação para relação a/c 0,40 é 524% inferior a relação com 0,50 o qual apresenta profundidade inferior de 258% em relação à a/c 0,65. Comparando a a/c 0,40 com 0,65 obtêm uma espessura de carbonatação de 2133%.

O aumento da porosidade, em tese, significa aumento da velocidade de carbonatação, ocasionando a diminuição dos poros, devido aos produtos da carbonatação se depositarem nestes locais. A diminuição da carbonatação pode ser realizada através da diminuição da relação a/c. Porém a cura e as pozolanas também exerce influência por estar diretamente ligadas a porosidade do concreto (HELENE 1986, apud NEVILLE, 1997).

A cura tem fundamental importância para que o concreto tenha uma boa hidratação. Secagens sem tempo adequado, prematuras, resultam em camadas superficiais porosas, que possuem baixa resistência ao ataque de agentes agressivos, como é o caso da carbonatação (LEVY e ALENE, 1996 apud CAVALCANTI FILHO 2009).

De acordo com Cavalcanti Filho e Cafange (2009) a carbonatação superficial está intimamente relacionada com a cura, pois esta afeta a hidratação nos primeiros milímetros. Tem-se que quanto maior for o grau de hidratação do cimento, menor será a quantidade de porosidade e permeabilidade, resultando em uma baixa carbonatação. O mesmo autor estudou a carbonatação em duas formas de cura: em câmara úmida (UR 90%) aos 7 dias; e aos 28 dias, identificando que os tempos de cura interferem na profundidade carbonatada. A cura aos 7 dias apresentou profundidade média de 6,44 mm, enquanto a de 28 dias apresentou profundidade média de 3,24 mm, um aumento de 98%, de 7 para 28 dias.

Após a cura dos corpos-de-prova, e antes do encaminhamento destes a câmara de carbonatação existe uma etapa importante no ensaio, este período de ensaio é denominado como pré-condicionamento ou sazonalamento, etapa entre a cura do material e à sua exposição à ação do CO_2 . As condições em que o concreto é exposto influenciam na carbonatação, o concreto absorve água de forma rápida, e as perdas ocorrerem de forma lenta, então é necessário que uma etapa para retirada do excesso de água seja conduzida no experimento. Um procedimento com menor eficiência porém muito utilizado é a exposição das amostras em ambiente de laboratório, com umidade e temperatura não controladas, como a temperatura varia bastante dependendo da região, torna-se um problema de normatização. Porém alguns centros de pesquisa realizam o pré-condicionamento em salas climatizadas, outros em estufa e

por fim algumas pesquisas não mencionam tal etapa, o que resulta em resultados heterogêneos para um mesmo material (SILVA e HELENE, 2007).

Outro aspecto importante é a umidade relativa, porém no meio técnico não há consenso de qual umidade é a ideal para a carbonatação, em laboratório as reações de carbonatação em geral são realizadas pelos pesquisadores com variação de 30 a 90%. Na tabela 10 são apresentados alguns valores de umidade relativa já estudados.

A temperatura é outro parâmetro que influencia o processo da carbonatação, e já se tem algum conhecimento a mais, dependendo do valor da temperatura ao qual o concreto é exposto, ocorre uma aceleração das reações de hidratação do cimento, melhorando ou piorando as condições microestruturais, caso a temperatura for alta ocorre a microfissuração do material causando a aceleração do ingresso dos agentes agressivos no concreto (SILVA e HELENE, 2007). Silva ainda cita que a maioria dos centros de pesquisa adotam temperaturas em torno de 23 a 25°C. Visto que a temperatura não possui padrão, assim como a umidade relativa, a variação entre as pesquisas ocorre entre 20 a 27 °C, não se sabe ao certo qual temperatura possui melhor eficácia, aliado a falta de padronização dos experimentos dificulta qual temperatura ideal se adotar. Nota-se também que a temperatura tem um efeito pequeno no fenômeno da carbonatação, em ensaios acelerados, o meio de transporte preponderante é a difusão do CO₂, cuja velocidade é pouco influenciada por variações de temperatura, especialmente sob as temperaturas usualmente empregadas.

Uma das principais variáveis ou se não a principal variável no processo de carbonatação em câmara acelerada é o teor de CO₂, que variam de 1% a condições de saturação. A literatura traz isso não significa que quanto maior a concentração de CO₂ no ambiente, em contato com a superfície do concreto, maior será a carbonatação (SILVA e HELENE, 2007).

Pauletti (2004) obteve como resultado em seu estudo que a carbonatação com teor de 6% de CO₂ traz resultados com maiores profundidades de carbonatação do que a câmara saturada de CO₂, em média 2,16 vezes mais.

Observa-se na literatura divergências em todos os parâmetros adotados para realização da carbonatação acelerada, principalmente a falta de informações sobre a concentração de CO₂. Alguns fatores com nível maior de conhecimento como é o caso da temperatura, umidade e a utilização de indicadores trazem segurança à normatização, porém a falta de informações sobre os demais parâmetros dificultam a comparação entre pesquisas realizadas.

2.6.1.2 Determinação da Carbonatação

Rilem (1988) A medida da frente ou profundidade de carbonatação é comumente e facilmente determinada através de indicadores de pH, o mais utilizado é a fenolftaleína, outros também são utilizados, mas com menor frequência são eles: timolftaleína; amarelo de alizarina GG; e amarelo de alizarina R (SILVA e HELENE, 2007).

Segundo os estudos de Pauletti (2004), a determinação da profundidade de carbonatação pode ser feita através do indicador químico de pH, fenolftaleína, sendo este o método mais difundido, pela sua praticidade e custo baixo.

O indicador deve ser aspergido na região recém-fraturada, para que não ocorra reação entre a face exposta pela fratura e o CO₂ do ar. Após a secagem do indicador pode-se utilizar uma resina incolor para que ocorra a fixação da cor. O limite entre as faces carbonatadas e não carbonatadas é mais evidente não superior ao de 24h após a aspensão do indicador, subentende-se que a medição da profundidade de carbonatação seja feita nesse período. A precisão deve ser de 0,5mm, valores inferiores devem ser descartados. Em amostras com agregados muito grandes, a carbonatação deve apenas ser medida na pasta de cimento (RILEM, 1988).

Antes do ensaio com a fenolftaleína, os corpos-de-prova podem ser marcados nas posições em que serão cortados, como o caso de Bourguignon (2004), mostrado na Figura 23, que estudou corpos cilíndricos de 100 x 200 mm seccionados transversalmente (em azul). As marcações longitudinais (em preto, vermelho e verde) foram feitas para localizar a posição das leituras de carbonatação, em cada face rompida.



Figura 23- Corte dos corpos-de-prova

Fonte: BOURGUIGNON (2004)

Coelho (2002) também utilizou corpos-de-prova cilíndricos seccionados transversalmente, por flexão, de modo a obter segmentos cilíndricos com aproximadamente 5 cm de altura. Com

mesma metodologia de marcação utilizada por Bourguignon (2004), justificando a marcação prévia como forma encontrada para não haver interferência, por parte do observador, na escolha dos pontos analisados e, para manter constantes as linhas para cada uma das determinações, em cada idade. A profundidade de carbonatação não varia ao longo da altura do corpo-de-prova o que justifica o rompimento ao longo de sua altura.

A espessura da camada carbonatada foi determinada por Coelho (2002) com aspersão de solução de fenolftaleína na face de ruptura das amostras. E a região carbonatada, com pH inferior a 9, permaneceu com a cor natural do concreto, já a superfície não carbonatada se mostrou em vermelho carmim. A Figura 24 mostra um corpo de prova seccionado, podendo ser observado às regiões carbonatadas e não carbonatadas.



Figura 24 – Corpo-de-prova carbonatado

Fonte: COELHO (2002)

3 MATÉRIAS E MÉTODOS

3.1 Materiais

Os materiais escolhidos para o experimento foram selecionados de acordo com a disponibilidade regional. O cimento utilizado foi o Portland CPV ARI, areia quartzosa, pedra britada e CBC proveniente da usina Santa Terezinha, do distrito de Iguatemi-PR, peneirada e passante na peneira com abertura 0,6 mm.

3.1.1 Cimento Portland

O aglomerante utilizado foi o Cimento Portland CPV-ARI.

As características do cimento são dadas pelo índice de finura do cimento, tempo de pega e da resistência a compressão estão dispostas na Tabela 10:

Tabela 10 - Caracterização do cimento CPV - ARI

Item de controle	Unidade	Média
Material Retido #200	%	0,05
Água de Consistência	%	31,05
Início de Pega	Horas	4:06
Fim de Pega	Horas	5:16
Resistência a 1 dia	MPa	25,30
Resistência a 3 dias	MPa	33,84
Resistência a 7 dias	MPa	38,41
Resistência a 28 dias	MPa	47,26

Fonte: Fabricante (VOTORANTIM)

As informações foram disponibilizadas pelo fabricante.

3.1.2 Agregado Miúdo

O agregado miúdo utilizado é proveniente da região de Maringá e de origem quartzosa. Sua caracterização se baseou em ensaios descritos nas normas: NM52:2003; NM45:2006; NM248:2003.

O agregado miúdo foi classificado como areia fina. Na tabela 11 são apresentadas a massa específica, diâmetro máximo e massa unitária no estado solto:

Tabela 11 - Caracterização do agregado miúdo

Característica	Unidade	Valores
Massa específica	kg/dm ³	2,658
Diâmetro máximo característico	mm	1,2
Módulo de finura	-	1,721
Massa unitária no estado solto	kg/dm ³	1,591

3.1.3 Agregado Graúdo

O agregado graúdo utilizado em todo o trabalho tem origem basáltica e é proveniente da região de Maringá, sua caracterização se baseou em ensaios descritos nas normas: NM52/2003; NM45/2006; NM248/2003, e os resultados estão apresentados na Tabela 12.

Tabela 12 - Caracterização do agregado graúdo

Característica	Unidades	Valores
Massa específica na condição seca	kg/dm ³	2,996
Absorção	%	1,89
Diâmetro máximo característico	mm	19,0
Módulo de finura	-	7,015
Massa unitária no estado compacto	kg/dm ³	1,714
Massa unitária no estado solto	kg/dm ³	1,606

3.1.4 Água

A água utilizada é proveniente da rede de abastecimento público da cidade de Maringá.

3.1.5 Cinza do bagaço da cana-de-açúcar

As CBC utilizadas no trabalho foram provenientes da usina Santa Terezinha, do distrito de Iguatemi-PR, passante na peneira com abertura 0,6 mm.

As análises químicas e físicas das cinzas foram realizadas por Nunes (2009) e estão apresentadas a seguir.

a) Matéria Orgânica e Carbono Orgânico

A Tabela 13 apresenta algumas propriedades químicas da CBC. Nunes (2009) avaliou o teor de umidade, matéria orgânica total e o carbono orgânico, o ensaio foi realizado a partir da média de três amostras.

Tabela 13 – Teor de umidade, matéria orgânica total e carbono orgânico

Nº	1	2	3
Teor de Umidade (%)	1,39	0,61	0,84
Média	0,95		
Matéria orgânica total (%)	3,82	3,04	3,79
Média	3,55		
Carbono orgânico (%)	2,12	1,69	2,11
Média	1,97		

Fonte: NUNES (2009)

b) Difração de Raios-X

Nunes (2009) concluiu que não existem fases amorfas bem definidas visto que os “backgrounds” são razoavelmente retilíneos e sem a curvatura característica de materiais amorfos. Como apresentado na Figura 25:

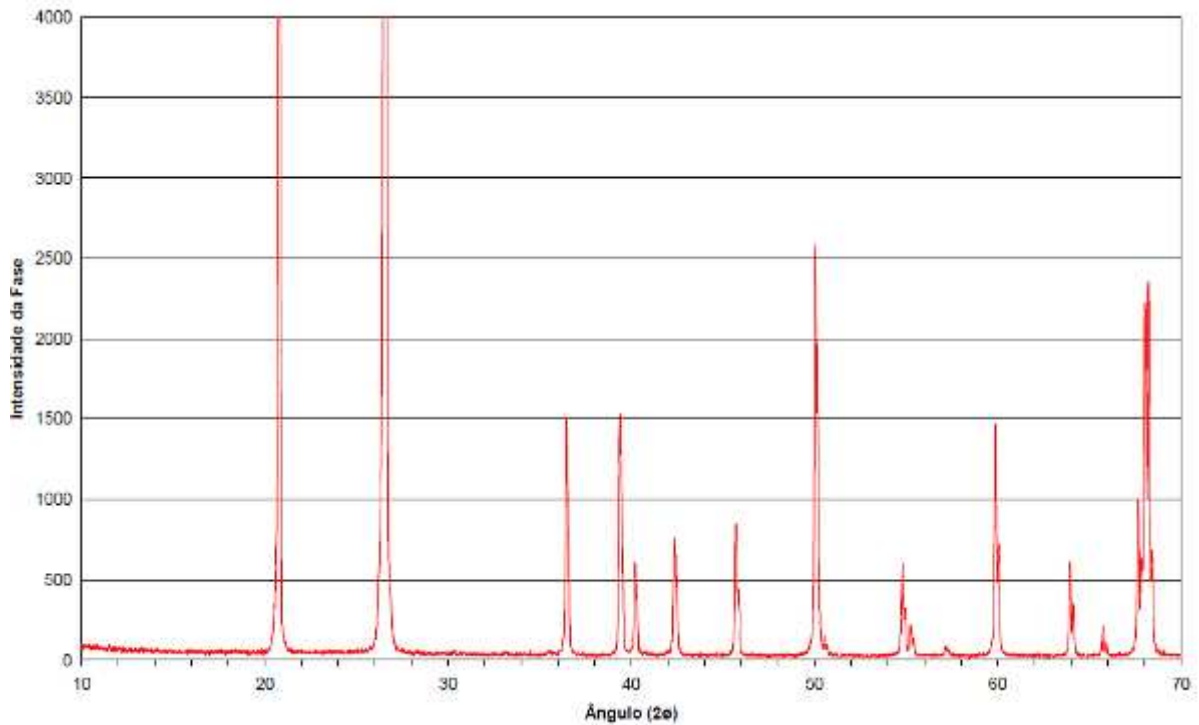


Figura 25 - DR - X da Cinza do bagaço da cana-de-açúcar

Fonte: NUNES (2009)

Através de comparação com os padrões de difração JCPDS-ICCD – International Centre for Diffraction Data (1996), não foi identificado estado amorfo, ela revelou a presença de uma fase altamente cristalina na forma de quartzo (SiO_2), demais minerais não foram registrados pelo equipamento. O que justifica a afirmativa que a cinza pode ser considerado material inerte e sem risco ambiental, podendo ser utilizado como agregado no concreto.

c) Atividade Pozolânica

Nunes (2009) realizou o ensaio de Chappelle Modificado para avaliar a atividade pozolânica da CBC, onde mediu a atividade de 23 mg CaO/g material. Este valor ficou abaixo do valor mínimo de 330 mg CaO/g pozolana, citado na publicação do ensaio Chappelle por Raverdy *et al.* (1980). Segundo este ensaio, a CBC pode ser considerada sem atividade pozolânica, portanto, inerte.

d) Área Específica

De acordo com Nunes (2009), a determinação da área superficial e volume dos poros foi realizada pelo método de Adsorção/Dessorção de N₂, em um equipamento Nova 1200 Series da Quanta Chrome, os resultados são analisados no Programa Autosorb 1 da Quantachrome, os parâmetros texturais são determinados a partir das isotermas de adsorção de N₂ obtidas. A área específica da cinza utilizada no trabalho foi determinada e é de 5356 m²/kg.

e) Massa específica

Para a massa específica, Nunes (2009) seguiu a metodologia da NBR 6508 (1984) – Grãos de solo que passam na peneira 4,8mm, ensaio realizado pelo picnômetro. Como apresentado na Tabela 14.

Tabela 14 - Massa Especifica da CBC

Amostra n		1	2
Capacidade do Picnômetro (ml)	-	500	500
Amostra Úmida (g)	P1	60	60
Amostra Seca (g)		60	60
Picnômetro + Solo + Água (g)	P2	678,7	672,8
Picnômetro + Água	P3	641,55	635,82
Massa Especifica dos grãos (médio) (g/cm³)	g ^s (médio)	2,61	

Fonte: Adaptado (NUNES, 2009)

f) Análise Granulométrica

A análise foi realizada segundo a NBR 7181 (1984) – Solo – Análise Granulométrica. Combinando peneiramento e sedimentação. Sendo definidos na Tabela 15 a porcentagem passante, na Tabela 16 a porcentagem retida e por último a Tabela 17 os coeficientes de uniformidade e curvatura:

Tabela 15 - Porcentagem passante (%)

Diâmetro dos Grãos (mm)	amostras (%)
2	100
0,6	100
0,2	50
0,06	4
0,002	2

Fonte: Adaptado (NUNES, 2009)

Tabela 16 – Porcentagem retida – classificação granulométrica NBR 6502/1995

Classificação segundo a NBR 6502/1995	Amostras %
0,6 a 2 mm (areia grossa)	0
0,2 a 0,6 mm (areia média)	50
0,06 a 0,2 mm (areia fina)	46
0,002 a 0,06 mm (silte)	2
≤ 0,002 mm	2

Fonte: Adaptado (NUNES, 2009)

Tabela 17 - Coeficientes de uniformidade e curvatura

Coeficiente	Amostras
D60	0,21
D30	0,18
D10	0,11
U	1,909
CC	1,403

Fonte: Adaptado (NUNES, 2009)

Quanto à uniformidade, a cinza se apresenta como muito uniforme e com boa distribuição granulométrica. Pode-se observar que mais de 50% das cinzas ficaram retidas na peneira

0,200 mm, observado que na classificação da NBR 6502/1995 elas se enquadram como areias médias. A distribuição proporcional do tamanho das partículas significa que as partículas menores ocupam os espaços deixados pelas maiores.

3.2 Métodos

3.2.1 Programa Experimental

Para análise do efeito da fração da cinza do bagaço da cana-de-açúcar em substituição a determinados teores de areia na produção de concretos foram moldados corpos-de-prova cilíndricos (100 x 200 mm) em concreto com teores de CBC em substituição da areia nas taxas de: 0%, 5%, 10%, 15%, 20%, 25%, 30%, 40%, 50%.

As características dos concretos produzidos foram avaliadas através do ensaio carbonatação e de resistência à compressão.

Na tabela 18 é apresentado o programa de concretagem dos corpos-de-prova.

Tabela 18 - Programa de concretagem

Série	% de CBC	Número de corpos de prova			
		Resistência à compressão	Carbonatação		
			14 dias	28 dias	56 dias
1	0	3	2	2	2
2	5	3	2	2	2
3	10	3	2	2	2
4	15	3	2	2	2
5	20	3	2	2	2
6	25	3	2	2	2
7	30	3	2	2	2
8	40	3	2	2	2
9	50	3	2	2	2
Total		27	18	18	18

3.2.1.1 Dosagem do concreto e Preparo dos corpos-de-prova

A dosagem do traço de referência foi definida em conjunto com a pesquisa de Secchi (2010), sendo adotado como traço unitário de referência 1:2,12:2,88 (c:a:p), com teor de argamassa de 52%, fator de a/c de 0,57 e abatimento de 60 mm \pm 10mm. A montagem do diagrama de dosagem foi feita de acordo com as leis comportamentais: Lei de Abrams; Lei de Lyse; Lei de Molinari.

A partir do traço de referência (com 0% de CBC), foram produzidos os outros traços substituindo parte da massa da areia por CBC conforme detalhado na Tabela 23.

A Figura 26 apresenta o diagrama de dosagem do traço de referência:

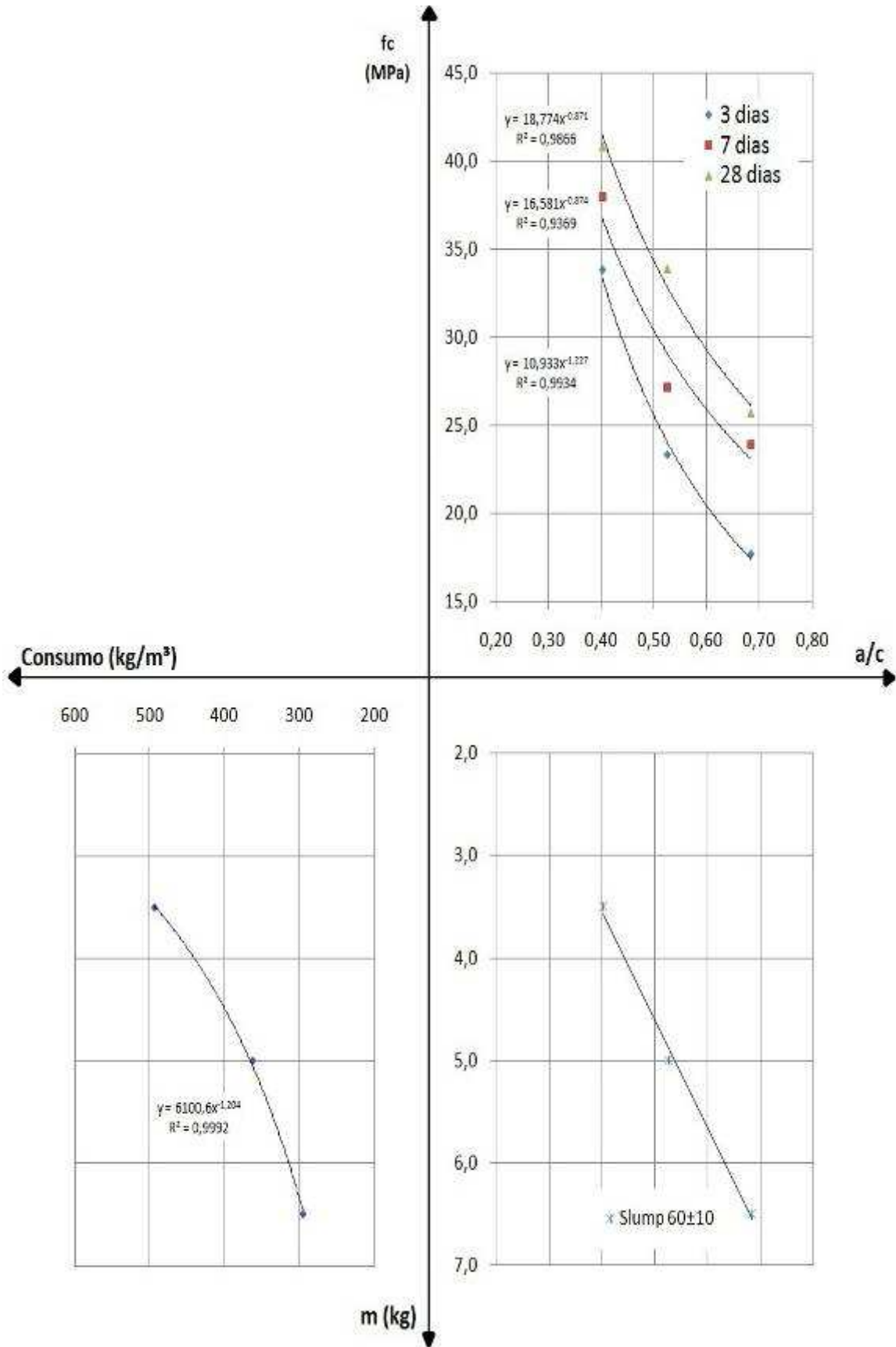


Figura 26 - Diagrama de dosagem do traço de referência

Fonte: SECCHI (2010)

Os traços utilizados na pesquisa estão apresentados na Tabela 19, em proporção de massa, os quais serviram como base para a confecção das amostras analisadas na pesquisa.

Tabela 19 - Traço utilizados (em massa)

% CBC	C	a	CBC	P	a/c
0	1	2,120	0	2,88	0,57
5	1	2,014	0,106	2,88	0,57
10	1	1,908	0,212	2,88	0,55
15	1	1,802	0,318	2,88	0,55
20	1	1,696	0,424	2,88	0,58
25	1	1,590	0,530	2,88	0,60
30	1	1,484	0,636	2,88	0,57
40	1	1,272	0,848	2,88	0,59
50	1	1,060	1,060	2,88	0,60

Os agregados utilizados na pesquisa (areia e brita) foram secos em local fechado e seco, afim de que perdessem a umidade e assim não interferisse nos resultados, tornando-se desnecessária a correção da água no momento da concretagem. A Figura 27 mostra o momento em que esta sendo executado a concretagem.



Figura 27 - Concretagem dos corpos-de-prova

3.2.2 Trabalhabilidade do Concreto (abatimento do tronco de cone)

A trabalhabilidade foi determinada pelo abatimento do tronco de cone e definida com o objetivo de facilitar a moldagem dos corpos-de-prova. Empregou-se nesta pesquisa o abatimento de 60 mm com tolerância de 10 mm para mais ou para menos. O ensaio foi realizado através do cone de ABRAMS, sendo baseado nos moldes da Norma NBR NM 67 (2008). A figura 28 mostra a execução do ensaio durante a pesquisa.



Figura 28 - Determinação de abatimento pelo método slump test

3.2.3 Cura do concreto

Os corpos-de-prova foram desmoldados após 24 horas, identificados e encaminhados a câmara úmida (ambiente com umidade relativa próxima a 99%), onde permaneceram por um período de 28 dias. Em seguida os CP's foram encaminhados aos seus respectivos ensaios conforme Tabela 19.

3.2.4 Resistência à compressão

Os ensaios de resistência à compressão foram realizados de acordo com a NBR 5739:2007. Este ensaio contou com a utilização de 3 corpos-de-prova por traço, sendo executado na idade de 28 dias, o ensaio aos 7 e 14 dias foi descartado pois não é o foco da pesquisa e já foi realizado esse acompanhamento de evolução de resistência ao longo do tempo por outros pesquisadores como apresentado na revisão de literatura.

3.3 Carbonatação

3.3.1 Preparo das amostras utilizadas para a determinação da carbonatação

3.3.1.1 Corte das amostras

Os corpos-de-prova cilíndricos com tamanho de 20x10 cm foram fatiados transversalmente em 4 partes com aproximadamente 5cm de altura, utilizando para isso um equipamento com serra circular adiamantada, pertencente a empresa Controlnort Engenharia de Controle. O corte esta sendo mostrado na Figura 29. Com isso aumentou-se em quatro vezes a quantidade de amostras, de 54 para 216, o que garante maior numero de leituras, aumentando a média estatística e a credibilidade dos resultados.



Figura 29 - Corte dos CP's

3.3.1.2 Pré-condicionamento

Os corpos-de-prova já cortados foram encaminhados a estufa onde permaneceram por um período de 60 horas com temperatura controlada a 50°C, a fim de diminuir a quantidade de água presente nos corpos-de-prova otimizando o processo de carbonatação acelerada na câmara.

A Figura 30 mostra como foi realizada a secagem.



Figura 30 - Pré-condicionamento das amostras

3.3.1.3 Impermeabilização e selagem

Logo após a etapa de pré-condicionamento, as amostras receberam uma camada de parafina em sua superfície lateral para que essa região fosse impermeabilizada, e pudesse evitar a penetração de CO_2 por mais de uma direção, assim as partes laterais não recebem CO_2 . A Figura 31 mostra peças com e sem parafina.



Figura 31 - Amostra impermeabilizada (a esquerda) e não impermeabilizada (a direita)

As amostras receberam embalagens especiais compostas por poliéster (17g/m^2) + adesivo (3g/m^2) + alumínio ($21,6\text{g/m}^2$) + adesivo (3g/m^2) + filme de polietileno (90g/m^2), esta embalagem teve a finalidade de manter as características adquiridas para o ensaio e favorecer a redistribuição da umidade. As amostras foram retiradas das embalagens apenas no início do ensaio de carbonatação acelerada.

3.3.1.4 Ensaio de Carbonatação Acelerada

Os ensaios de carbonatação acelerada foram realizados em duas câmaras de carbonatação, ambas possuíam o mesmo sistema de alimentação e recebiam o mesmo percentual de CO_2 , após a primeira leitura aos 14 dias houve diminuição da quantidade de CO_2 inserida na câmara, que passou de 5% a 1% (devido ao alto consumo). As câmaras estão inseridas numa sala climatizada, o controle da temperatura foi de $20\pm 1^\circ\text{C}$ e umidade relativa de $70\pm 5\%$ mantida com solução saturada de NaCl durante todo o período de ensaio. Os corpos-de-prova ficaram confinados por um período de 14, 28 e 56 dias, foi o escolhido três idades para que fosse possível monitorar o avanço da carbonatação.

A Figura 32 mostra os CP's sendo depositados em seu interior. (falar do funcionamento da camara)



Figura 32 - Câmara de carbonatação 1 sendo preenchida com os CP's

A Figura 33 mostra as duas câmaras durante o período de ensaio.



Figura 33 - As duas câmaras de carbonatação

3.3.1.5 Procedimentos para Obtenção dos Resultados

A profundidade de carbonatação foi obtida através da utilização de uma solução ácido/base nas proporções de 1% de fenolftaleína, 70% de álcool etílico e 29% de água destilada, esse indicador em contato com a região carbonatada não altera a cor do concreto, mas quando em contato com a região não carbonatada a cor é alterada para vermelho carmim.

A análise da profundidade carbonatada foi feita a partir de sua medida em seis pontos de cada parte da amostra fraturada, cada traço possui 8 amostras (16 partes), a medida foi feita manualmente com auxílio de paquímetro digital com precisão de décimos de milímetro.

As etapas para realização das medidas de cada imagem são as seguintes:

- a) Rompimento das amostras. As partes foram todas rompidas ao meio por compressão diametral, através da aplicação de força na lateral do CP, com um bastão na região onde se esperava o rompimento. A Figura 34 mostra a forma como foi aplicado a força.



Figura 34 - Rompimento para medida da frente de carbonatação

- b) Em seguida as partes recém fraturadas foram aspergidas com solução de fenolftaleína como mostra a Figura 35.



Figura 35 - Aspersão de fenolftaleína

- c) Decorrido aproximadamente 1 hora após a aspersão da fenolftaleína as amostras secaram, e assim foi realizada a medição da frente de carbonatação no interior do concreto. Na medição foram consideradas as duas laterais dos CP's a fim diminuir o erro da análise estatística. Foi realizada a medição com auxílio de paquímetro digital, Sendo feitas três medidas por lado: esquerda; direita e centro, conforme a Figura 36 apresenta os pontos em vermelho.



Figura 36 - Medida da frente de carbonatação

No capítulo seguinte serão apresentados os resultados desses ensaios e a discussão em torno dos mesmos.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Primeiramente foram analisados os resultados de resistência à compressão aos 28 dias, em seguida os resultados da carbonatação dos concretos produzidos com diferentes níveis de adições de CBC, bem como as considerações a respeito dos mesmos.

4.1 Resistência à compressão do concreto

Apesar de substituir o agregado miúdo por CBC à resistência a compressão alcançada não teve alteração brusca em relação ao traço padrão, sendo muito próxima das variações nas pesquisas realizadas por Souto (2010), Nunes (2009) quando substituíram cinza por cimento. A Tabela 20 apresentam os valores de resistência aos 28 dias.

Tabela 30 - Resistência aos 28 dias

Traço	Cinza (%)	fc (MPa) CP1	fc (MPa) CP2	fc (MPa) CP3	Média (MPa)	Evolução/ relação traço padrão %
1	0	29,42	27,99	x	28,72	-
2	5	27,98	27,70	29,73	28,48	-0,83
3	10	29,60	30,01	29,67	29,77	3,67
4	15	26,92	30,88	32,10	29,98	4,39
5	20	29,98	31,19	30,60	30,60	6,57
6	25	29,85	29,70	29,67	29,75	3,6
7	30	24,67	29,32	28,23	27,42	-4,52
8	40	28,73	27,95	27,85	28,19	-1,84
9	50	25,98	26,52	25,48	26,00	-9,45

A Figura 37 mostra a representação gráfica indicando a média da resistência à compressão relacionada aos teores de cinzas acrescentados.

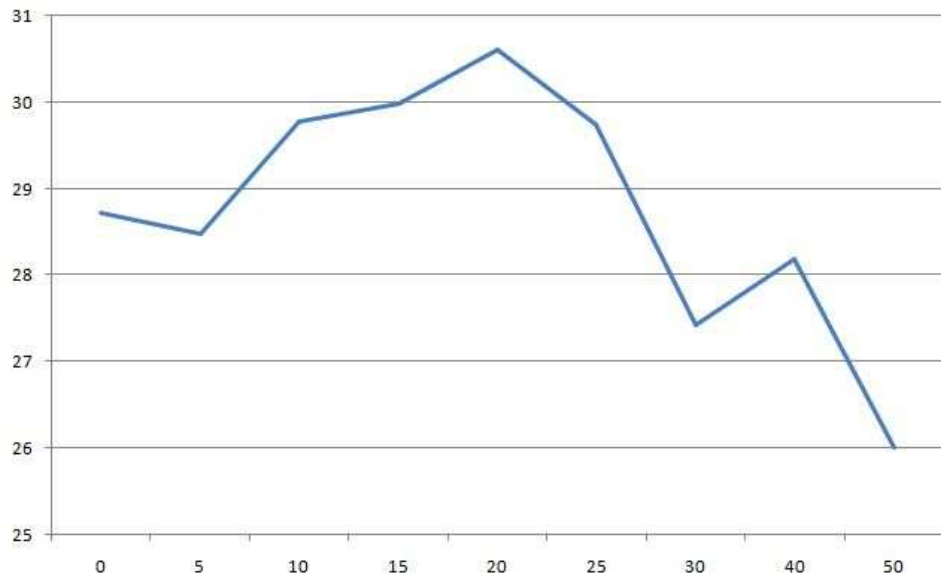


Figura 37 - Variação de resistência a compressão

De acordo com os resultados experimentais, observa-se que aos 28 dias de cura do concreto, a CBC pode promover um acréscimo de resistência de até 6,57% em relação ao CP padrão. Perceber-se também que os maiores acréscimos nas resistências à compressão ocorreram com porcentagens de CBC de 15 e 20%, respectivamente 4,39% e 6,57%. A maior resistência individual foi alcançada pela amostra com 15% de CBC, com 11,78% de variação. A substituição de 5% teve variação menor que 1%, sendo assim considerada insignificante. Com 10% de CBC houve aumento de resistência, acréscimo de 3,16%. A substituição de CBC por areia relacionada à resistência à compressão se mostra viável em até 25%, após essa porcentagem há decréscimo de resistência, o que está condizente com a literatura.

4.2 Carbonatação

Como dito anteriormente, a medida da frente de carbonatação foi realizada em três etapas, nota-se que os corpos-de-prova com acréscimo de CBC apresentaram dificuldade de avanço da frente de carbonatação em alguns teores, como apresenta a Tabela 21. Há uma relação com o acréscimo de resistência à compressão, onde os melhores resultados foram entre os traços com 15 e 20% de CBC.

Tabela 41 - Mediana da frente de carbonatação (mm)

Traço	%	Idade 14 Dias	Idade 28 Dias	Idade 56 Dias
1	0	2,47	2,77	3,94
2	5	2,51	2,41	3,82
3	10	2,73	2,39	3,70
4	15	1,79	1,73	2,64
5	20	2,65	1,35	3,78
6	25	2,43	2,40	2,54
7	30	2,35	2,33	3,45
8	40	3,03	2,04	4,19
9	50	3,74	2,81	5,36

Aos 14 dias, o traço 4 obteve o menor índice de avanço de carbonatação em relação ao traço padrão, a frente de carbonatação foi 27% inferior. Aos 28 dias não houve evolução da frente de carbonatação quando relacionado aos 14 dias, sendo a mediana em alguns pontos inferiores. O resultado em que a frente de carbonatação foi a menor em relação ao traço padrão foi o traço 5, 51% inferior, o traço 4 apresentou similaridade com o resultado aos 14 dias, sendo a média 37% inferior. Aos 56 dias ocorreu evolução da frente de carbonatação quando relacionado às idades de 14 e 28 dias, o traço com menor taxa de carbonatação foi o 6 com taxa de 35% inferior ao traço padrão, o traço 4 também apresentou a similaridade anterior, tendo um índice 32% inferior de carbonatação em relação ao traço padrão.

Aos 14 dias houve acréscimo da frente de carbonatação nos traços 2, 3, 5, 8 e 9. Aos 28 dias apenas o traço 9 teve avanço maior que o padrão. Aos 56 dias de exposição ao CO₂ houve aumento apenas nos teores 8 e 9. A Figura 38 mostra a representação gráfica e evidencia a evolução e os resultados da carbonatação acelerada.

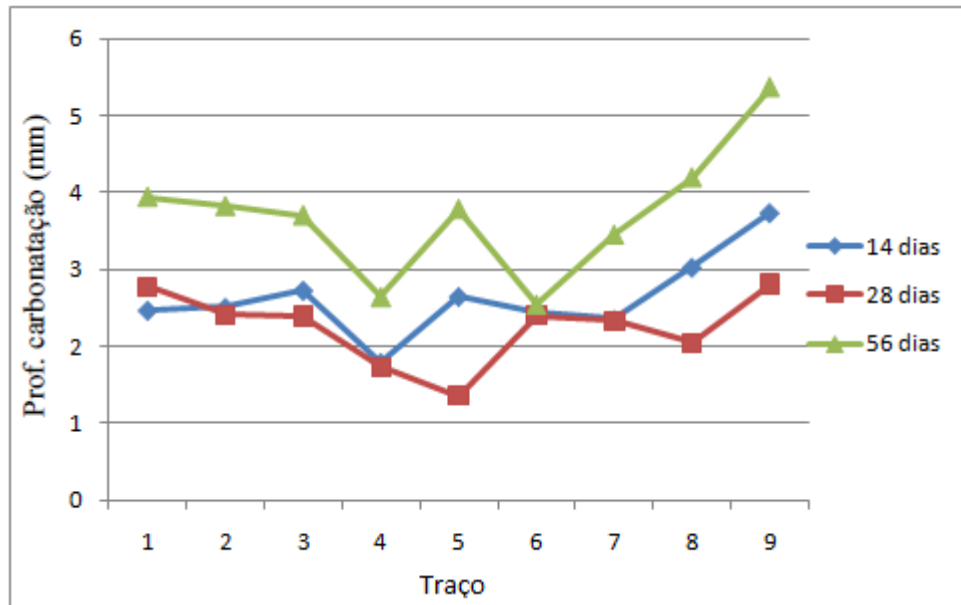


Figura 38 - Frente de carbonatação média

Observa-se na figura o comportamento de incremento da profundidade carbonatada com a relação de acréscimo de cinza por ocasião das leituras, com exceção do Traço 5 aos 14 dias, todos os corpos-de-prova com acréscimo até 30% encontram-se menos parcialmente carbonatados, enquanto que os acréscimo superiores a 40% apresentam-se mais carbonatados que os corpos-de-prova padrão.

No trabalho também foi monitorado a carbonatação em relação as partes dos CP's, acreditava-se que quanto mais próximo da base, menor seria a frente de carbonatação. Isso porque a concentração de água seria maior na base, devido à gravidade. Porém isso não foi evidenciado nos resultados, o fato de haver um pré-condicionamento para diminuir a quantidade de água nos poros certamente influenciou nos resultados que foram todos aleatórios.

4.3 Análise Descritiva

Os efeitos das variáveis da carbonatação também foram estudados através do método estatístico (ANOVA não-paramétrica) teste de Kruskal-Wallis. Baseado nisso, a tabela 22 apresenta algumas medidas descritivas interessantes sobre a variável de infiltração, considerando cada teor de substituição da areia por CBC.

Tabela 22 – Medidas Descritivas da Variável de Infiltração.

Teor	Média	DP	Mediana	CV%
0%	3.05	1.319	2.87	43.133
5%	2.91	1.497	2.64	51.274
10%	2.97	1.458	2.81	49.028
15%	1.99	1.491	2.00	74.671
20%	2.61	1.661	2.61	63.447
25%	2.46	1.338	2.43	54.392
30%	2.81	1.850	2.53	65.668
40%	3.15	2.095	2.94	66.468
50%	4.26	2.504	3.78	58.738

Através do quadro acima é possível observar que existe uma variação homogênea entre os teores e as médias são relativamente próximas. Em termos medianos, observa-se que os níveis de substituição de 5% a 30% se apresentam inferiores, o que ocorre na média também. Neste ponto é válido considerar a mediana, pois descritivamente observa-se que existem indícios de que o comportamento da resposta não é simétrico, por isso esse trabalho trata a carbonatação apenas utilizando à mediana.

As variações das infiltrações também podem ser observadas nas figuras 39, 40 e 41. A linha central do boxplot é a mediana, acima da linha, os valores da mediana em mm, abaixo temos letras, quando forem iguais não indicam diferenças estatisticamente, ou seja quando as letras diferirem indicam diferenças estatísticas obtidas no teste de Kruskal-Wallis.

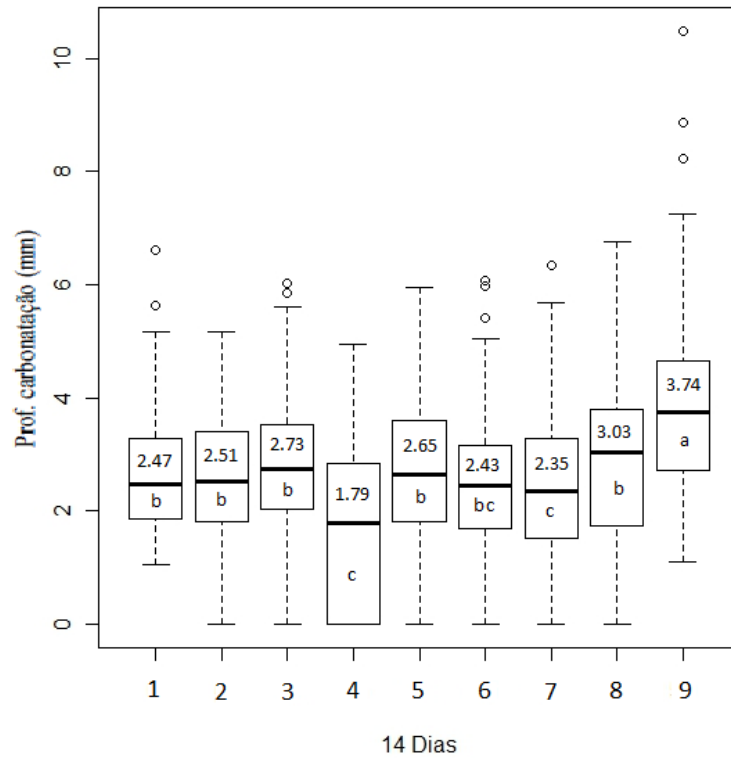


Figura 39 - Profundidade carbonatada 14 dias

Aos 14 dias observa-se que estatisticamente os traços 1, 2, 3 e 5 são considerados iguais, o Traço 4 e 7 apresentam o menor índice de carbonatação, e estatisticamente são considerados iguais, já o traço 6 apresenta variação inferior ao Padrão, e superior ao traço 4 e 7, o maior índice fica por conta do traço 9, que difere por seu índice de carbonatação ser superior ao Padrão.

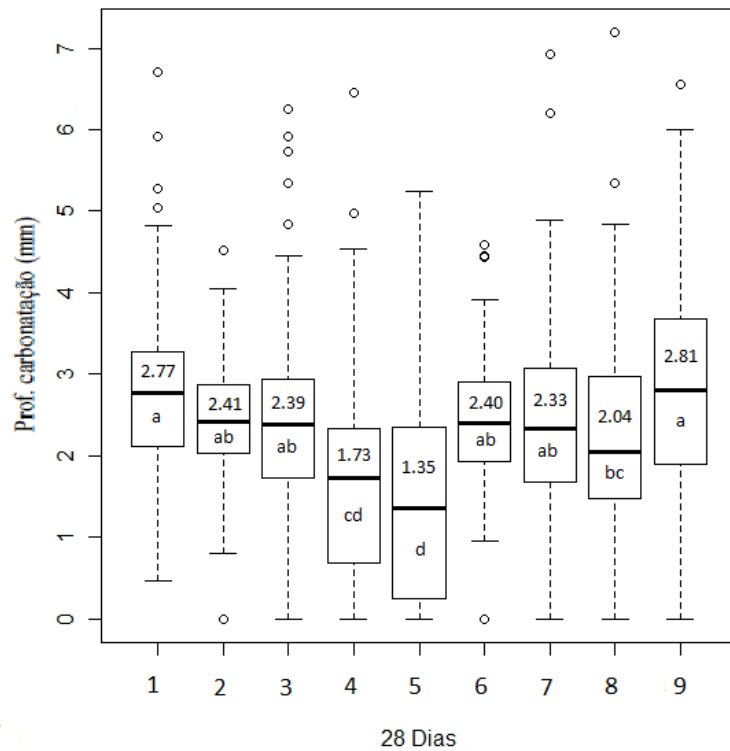


Figura 40- Profundidade carbonatada 28 dias

Aos 28 dias observa-se que há uma queda de infiltração entre o traço 2 e 3 em relação ao padrão, a queda de infiltração ainda continua entre os traços 4 e 5, identificando o traço 5 como o menor grau de infiltração, o traço 6 e 7 são considerados iguais ao traço 2 e 3, já o traço 8 é considerado inferior aos traços 2, 3, 6 e 7, e superior ao 4 e 5, o traço 9 manteve-se como o traço padrão, não tendo relevante variação estatística.

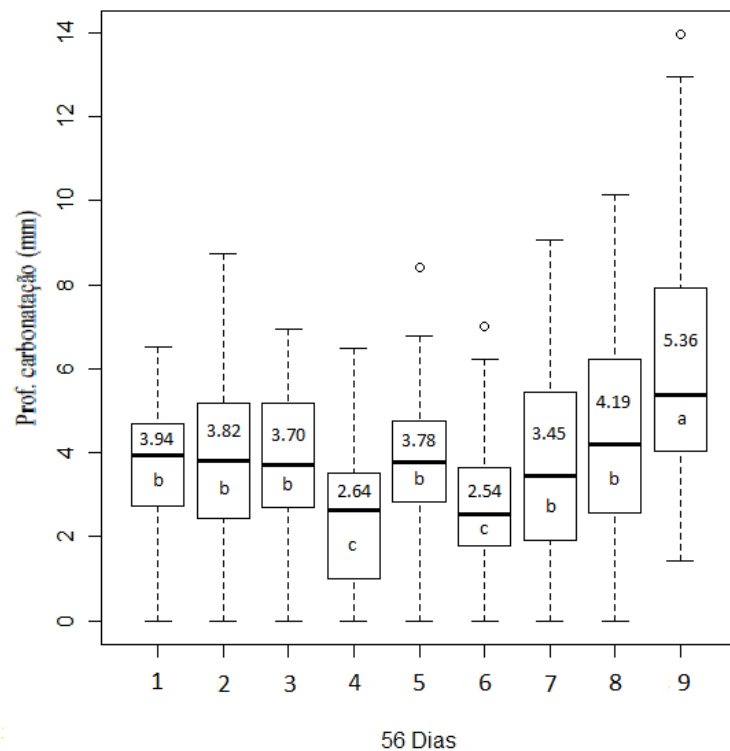


Figura 41- Profundidade carbonatada 56 dias

Aos 56 dias observa-se que os traços 1, 2, 3, 5, 7, 8 tiveram pequenas variações, o que indicou que não houve variação estatística de infiltração, já os traços 4 e 6 possuem menor infiltração de CO₂ que os primeiros traços, o que caracteriza estes como os traços com de menor grau de infiltração, já o traço 9 possui o maior índice de infiltração de CO₂.

Em geral os traços que obtiveram melhores resultados estão entre as substituições de 10 a 25% de cinza, e o pior resultado foi alcançado pelo traço com substituição de 50% de cinza, que em duas ocasiões foi superior ao padrão. Observa-se que os concretos produzidos com a substituição de cinza apresentaram efeitos estatisticamente significativos, embora seja observada a necessidade de maior tempo de exposição das amostras, o que traria maior confiabilidade nos resultados. A metodologia utilizada para obter os resultados de profundidade de carbonatação, mostrou-se adequada para este estudo.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

A substituição de areia por CBC em concretos gera em determinados teores acréscimos significativos do ponto de vista da resistência à compressão, foi obtido o melhor resultado com o teor de 20%, sendo viável a substituição de até 25% por apresentar resistência superior ao traço de referência, em porcentagens superiores houve queda na resistência à compressão.

As partículas de CBC possuem diâmetro reduzido, o que faz com que os espaços vazios do concreto sejam preenchidos por essas partículas, elevando assim a capacidade de resistência do concreto. Como fruto desse estudo pode-se sugerir que a CBC pode ser empregada na produção de concretos com duas funções: a) aumentar a resistência à compressão do concreto, sendo que para isso pode-se substituir a areia por CBC em até 20%; b) a fim de diminuir a extração de recursos naturais (areia), sendo que neste caso pode-se substituir a areia por CBC em até 25% sem haver perdas nas propriedades mecânicas do concreto.

O estudo da carbonatação acelerada simulou um ambiente agressivo em laboratório, sendo de suma importância para que se possa extrapolar os resultados experimentais para casos reais.

A metodologia adotada nesta pesquisa mostrou-se válida devido à obtenção de concretos menos susceptíveis a despassivação e assim a carbonatação. A ação do agente agressivo foi medida em três oportunidades, sendo verificado em todas elas que a substituição por CBC se mostra viável em teores de substituição de até 20%. Sendo o teor de 15% o que apresentou a menor taxa de carbonatação. Isso porque a CBC tem granulometria pequena e provoca uma descontinuidade nos poros, reduzindo a permeabilidade dos concretos. Outro fator marcante foi que entre as idades de 14 e 28 dias não houve aumento de carbonatação, isso porque a carbonatação tem como resultados a geração de moléculas de água que dificultam a passagem do CO₂, diminuindo assim o progresso da carbonatação.

É importante salientar que os dados apresentados neste trabalho referem-se à CBC peneirada e coletada na Usina de Santa Terezinha situada em Maringá-PR.

O reaproveitamento desse resíduo é importante para a cadeia produtiva, certamente o maior ganho será o ambiental entre elas:

- Redução do volume de resíduos destinados a aterros sanitários e, conseqüentemente, uma diminuição no risco de contaminação do meio ambiente;
- Redução do volume de extração de areia necessária à produção de materiais para construção, deixando assim de explorar as margens de rios, que são recursos naturais não renováveis.

A inserção de uma alternativa sustentável é observada com o emprego da CBC como substituto da areia. A construção sustentável baseia-se em preservação ambiental e redução dos resíduos pelo desenvolvimento de tecnologias limpas e este estudo se encaixa nesse perfil.

5. 1 Trabalhos Futuros

- Estudar a resistência à cloretos e sulfatos em concretos contendo CBC.
- Analisar a viabilidade econômica de utilizar CBC na produção de concretos em obras da construção civil.

6 BIBLIOGRAFIA

ABE, M. A. P. **Desenvolvimento de concretos de alta resistência utilizando a cinza do bagaço da cana-de-açúcar como adição mineral**, 2010. 59 f. Monografia (Trabalho de conclusão de curso) dpto Engenharia Civil – Universidade Estadual de Maringá-PR, Maringá, 2010.

ABREU, A. G. **Estudo da corrosão da armadura induzida por carbonatação em concretos com cinza volante**. 2004. 212f. Tese (Doutorado em Engenharia) - Escola de Engenharia, Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2004.

ANDRADE, C.; ALONSO, C.; BACLE, B. **Accelerated testing methodology for evaluating carbonation and chloride resistance of concrete coatings**. In: FIP SYMPOSIUM, [s. ed.], 1988, Israel. Proceedings... Jerusalem, Sep 1988. p. 61-67.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 10.004**. Resíduos sólidos: classificação. Rio de Janeiro – RJ, 2004.

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

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

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

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

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7181**: Solo. Análise Granulométrica. Rio de Janeiro – RJ, 13p, 1984.

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

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 8522**: Determinação dos módulos estáticos de elasticidade e de deformação e da curva tensão de formação. Rio de Janeiro, 1993.

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

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

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

BOURGUINGNON, K. M. B. G. B. **influencia da resistência a compressão na carbonatação de concretos com diferentes teores de escória de alto forno**. 150p.

Dissertação (Mestrado em eng. Civil) – Universidade Federal do Espírito Santo. Vitória-ES. 2004.

CADORE, W. W.; CEHELLA, I. G.; GASTALDINI, A. L. G.; DIESEL, F. B. **Ensaio Acelerados e Naturais na Carbonatação de concretos com Altos Teores de Adição Mineral**. 2007. In: 49º Congresso Brasileiro do Concreto – IBRACON.

CAPUZZO, V. M. S.; LIBORIO, J. B. L. **Comportamento da frente de carbonatação em elementos estruturais e suas conseqüências**. 2007. In: 49º Congresso Brasileiro do Concreto – IBRACON.

CAVALCANTI FILHO, A. N.; CAFANGE, D. M. P. J. **Carbonatação : Estudo de ensaios acelerados por ciclagem em concretos com diferentes períodos de cura**. 2009. In: 51º Congresso Brasileiro do Concreto – IBRACON.

CETESB. **A Produção Mais Limpa (P+L) no Setor Sucroalcooleiro – informações gerais**. São Paulo, 2002. Disponível em <http://www.agencia.cnptia.embrapa.br/Repositorio/Adubacao_organica_producao_mais_limpaID-37HFh1RpEg.pdf> . Acesso em 18/03/2010.

COELHO, M. A. M. **Contribuição ao estudo da carbonatação e retração em concretos com elevados teores de escoria de auto-forno**. 180p. Dissertação (Mestrado em eng. Civil) – Universidade Federal do Espírito Santo. Vitória-ES, 2002.

COMITÉ EUROPÉEN DE NORMALISATION. **PrEN 13295**: Carbonation Resistance (English Version). CEN/TC 104/SC 8 N 591, (Revised draft prepared by WG 2 for formal vote), France, feb 2000.

CONABE **Companhia nacional de abastecimento. Acompanhamento da safra brasileira: cana-de-açúcar. Safra 2010/2011**. Brasília, CONABE, 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 de Doutorado. COPPE/Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2006.

CORDEIRO, G. C.; TOLEDO FILHO, R. D.; FAIRBAIRN, E. M. R.. **CARACTERIZAÇÃO DE CINZA DO BAGAÇO DA CANA-DE-AÇÚCAR PRA O EMPREGO COMO POZOLANAS EM MATERIAIS CIMENTÍCIOS**. Revista Química Nova, v.32, n.1, p.82–86, 2009.

DANTAS, M. C.; MOREIRA, H. P.; TAVARES, M.; ANJOS, M. A. S.; BORJA, E. V.; PEREIRA, A. C. **INFLUENCIA DO USO DE CINZA DE BIOMASSA DA CANA-DE-AÇÚCAR NO COMPORTAMENTO DE CONCRETOS AUTO-ADENSÁVEIS**. Revista HOLOS, periódico científico do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Rio Grande do Norte (IFRN), Holos, Ano 25, Vol. 4, 2009.

DE PAULA, M. O. **POTENCIAL DA CINZA DO BAGAÇO DA CANA-DE-AÇÚCAR COMO MATERIAL DE SUBSTITUIÇÃO PARCIAL DE CIMENTO PORTLAND**.

77p. Dissertação (Mestrado em eng. Agrícola) – Universidade Federal de Viçosa. Viçosa-MG, 2006.

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.

GASPARIM, J. C. **Concreto planejado elaborado com cimentos especiais: análise segundo parâmetros de durabilidade.** São Paulo, 111 p. dissertação de Mestrado. Universidade de São Paulo, USP, 2007.

HELENE, P. R. L. **Contribuição ao estudo da corrosão em armaduras de concreto armado.** 1993. 231f. Tese (Doutorado em Engenharia) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 1993.

HOPPE, A. E. **Carbonatação em Concreto com Cinza de Casca de Arroz sem Moagem.** Santa Maria, 147 p. dissertação de Mestrado. Universidade Federal de Santa Maria, UFSM, 2008.

HOPPE, T. F. **Resistividade elétrica de concretos contendo diferentes teores de cinza de casca de arroz.** Santa Maria, 147 p. dissertação de Mestrado. Universidade Federal de Santa Maria, UFSM, 2005.

LIMA, S. A.; MORETTI, J. P.; SANTOS, T. J. **Análise de argamassas confeccionadas com a cinza do bagaço da cana-de-açúcar em substituição ao agregado miúdo,** Revista Tecnológica, Edição Especial ENTECA 2009, p. 87-97, 2009.

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

Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento. Disponível em: <http://www.agricultura.gov.br/>. Acesso em: 05/04/2010.

MOREIRA, M. A. L.; SILVA, F. G.; HELENE, P. **A influencia do pré-condicionamento na carbonatação acelerada de argamassas de diferentes porosidades.** 2007. In: 49º Congresso Brasileiro do Concreto – IBRACON.

MOURA, W. A.; LIMA, M. B. L.; GONÇALVES, J. P.; LIMA, P. R. L.; BOAVENTURA, M. C. **AVALIAÇÃO DE DESEMPENHO, QUANTO À CARBONATAÇÃO, DE CONCRETOS PRODUZIDOS COM RESÍDUOS DE CONSTRUÇÃO E DEMOLIÇÃO.** 2007. In: 49º Congresso Brasileiro do Concreto – IBRACON.

NEVILLE, A. M. **Propriedades do Concreto.** Tradução: Salvador E. Giammusso. 2ªed. rev. atual., São Paulo: Pini, 1997. 828p.

NUNES, I. H. S; **Estudo das características físicas e química da cinza do bagaço de cana-de-açúcar.** Dissertação de Mestrado. PEU / Universidade Estadual de Maringá, 2009.

REUNION INTERNATIONALE DE LABORATOIRES D'ESSAIS ET MATERIAUX. CPC-18: Measurement of hardened concrete carbonation depth. (RILEM Recommendations CPC-18). **Materials and Structures**, [s. n.], p. 453-455, 1988.

SATOLO, L. F., **Dinamica Economica das flutuações na produção de cana-de-açúcar.** Dissertação (mestrado), Universidade de São Paulo, Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz” 2008.

SCANDIFFIO, M. I. G. **Análise Prospectiva do Alcool Combustível no Brasil – Cenários 2004 - 2024**. 182p. Tese (Doutorado em Engenharia mecânica) – Universidade Estadual de Campinas – UNICAMP, Campinas-SP, 2005.

SEABRA, J. E. A. **Avaliação técnico-econômica de opções para o aproveitamento integral da biomassa de cana no Brasil**. 298p. Tese (Doutorado em Engenharia mecânica) – Universidade Estadual de Campinas – UNICAMP, Campinas-SP. 2008.

SECCHI, M. **Diagramas de dosagem para concretos convencionais com a utilização da cinza do bagaço da cana-de-açúcar como adição mineral** 2010. 59 f. Monografia (Trabalho de conclusão de curso) dpto Engenharia Civil – Universidade Estadual de Maringá-PR, Maringá, 2010.

SILVA, F. G.; HELENE, P. **Carbonatação acelerada e medida da carbonatação: fatores intervenientes nos ensaios**. 2007. In: 49° Congresso Brasileiro do Concreto – IBRACON.

SIMÕES, M. S. **Relação entre Indicadores de Crescimento e de Produção da Cana-de-Açúcar e Dados Espectrais Terrestres e Orbitais**. 182p. Tese (Doutorado em Engenharia mecânica) – Universidade Estadual de Campinas – UNICAMP, Campinas-SP, 2004.

SOUTO, J. M. F; **Avaliação do Desempenho da Cinza do Bagaço de Cana-de-açúcar na Produção de Concretos**. Dissertação de Mestrado. PEU / Universidade Estadual de Maringá, 2010.

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

VAGHETTI, M. A. **ANÁLISE CRÍTICA DA DURABILIDADE DOS CONCRETOS COM ADIÇÕES MINERAIS COM VISTAS À CORROSÃO DAS**. 2007. In: 49° Congresso Brasileiro do Concreto – IBRACON.

VEIGA FILHO. A. A. **MECANIZAÇÃO DA COLHEITA DA CANA-DE-AÇÚCAR NO ESTADO DE SÃO PAULO: UMA FRONTEIRA DE MODERNIZAÇÃO TECNOLÓGICA DA LAVOURA**. 144p. Dissertação (Mestrado em Política Científica e Tecnológica) – Universidade Estadual de Campinas – UNICAMP, Campinas-SP, 1998.

VIEIRA, R. M. S.; MARQUES, V. C. **Carbonatação natural de concretos – influencia de características dos materiais e de fatores ambientais**. 2009 In: 51° Congresso Brasileiro do Concreto – IBRACON.

PAULA, M. O.; TINÔCO I. F. F.; RODRIGUES, C. S.; SILVA, E. N.; SOUZA, C. F. **Potencial da cinza do bagaço da cana-de-açúcar como material de substituição parcial de cimento Portland**. Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental v.13, n.3, p.353–357, 2009 Campina Grande, PB, UAEA/UFMG – <http://www.agriambi.com.br> Protocolo 035.07 – 16/03/2007 • Aprovado em 29/10/2008

PAULETTI, C. **Análise comparativa de procedimentos para ensaios acelerados de carbonatação**. 2004. 176 f. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal do Rio Grande do Sul, UFRGS, 2004.

PAULETTI, C.; POSSAN, E.; DAL MOLIN, D. C. C. **Carbonatação acelerada: estado da arte das pesquisas no Brasil.** Rev. Ambiente Construido (Online), v. 7. 7-20, 2007

PARROT, L. J. **A review of carbonation in reinforced concrete.** Wexham Springs, Cement and Concrete Association. 1986, 69p.

REUNION INTERNATIONALE DE LABORATOIRES D'ESSAIS ET MATERIAUX. CPC11.1: Absorption of water by concrete by immersion. 2 ed. (RILEM Recommendations CPC11.1, TC14-CPC). **Materials and Structures**, v. 7, n. 40, 1982a, 1p.

RIBEIRO, D. C. F.; PELISSER, F.; GLEIZE, J. P.. **Estudo da Porosidade em Concretos com Diferentes Classes de Resistência e Adições Mineraiis.** ANAIS DO 51º CONGRESSO BRASILEIRO DO CONCRETO - CBC2009 – 51CBC0124. 2009.

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