

**UNIVERSIDADE DO VALE DO RIO DOS SINOS - UNISINOS
UNIDADE ACADÊMICA DE PESQUISA E PÓS-GRADUAÇÃO
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL
NÍVEL MESTRADO**

ALEXANDER PLETSCH

**AVALIAÇÃO DA CARBONATAÇÃO EM MATERIAIS CIMENTÍCIOS COM
SUBSTITUIÇÃO DE CIMENTO PORTLAND POR CINZA
DO BAGAÇO DA CANA-DE-AÇÚCAR**

São Leopoldo

2019

ALEXANDER PLETSCH

**AVALIAÇÃO DA CARBONATAÇÃO EM MATERIAIS CIMENTÍCIOS COM
SUBSTITUIÇÃO DE CIMENTO PORTLAND POR CINZA
DO BAGAÇO DA CANA-DE-AÇÚCAR**

Dissertação apresentada como requisito parcial para obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil, pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade do Vale do Rio dos Sinos – UNISINOS.

Orientador: Prof. Dr. Claudio de Souza Kazmierczak

São Leopoldo

2019

P724a

Pletsch, Alexander.

Avaliação da carbonatação em materiais cimentícios com substituição de cimento Portland por cinza do bagaço da cana-de-açúcar / por Alexander Pletsch. – 2019.

159 f. : il. ; 30 cm.

Dissertação (mestrado) — Universidade do Vale do Rio dos Sinos, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, São Leopoldo, RS, 2019.

“Orientador: Dr. Claudio de Souza Kazmierczak”.

1. Cinza do bagaço da cana-de-açúcar.
2. Pozolanas. 3. Carbonatação. I. Título.

CDU: 691.322

ALEXANDER PLETSCH

**AVALIAÇÃO DA CARBONATAÇÃO EM MATERIAIS CIMENTÍCIOS COM
SUBSTITUIÇÃO DE CIMENTO PORTLAND POR CINZA
DO BAGAÇO DA CANA-DE-AÇÚCAR**

Dissertação apresentada como requisito parcial para obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil, pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade do Vale do Rio dos Sinos - UNISINOS

Aprovado em 30 de agosto de 2019

BANCA EXAMINADORA

Cristiane Pauletti – Universidade Luterana do Brasil (ULBRA)

Mauricio Mancio – Universidade do Vale do Rio dos Sinos (UNISINOS)

À minha família:

Ao meu pai Enio Pletsch, seu caráter e sua generosidade são heranças mais valiosas que me ensinou!

À minha mãe Vativia Jantsch Pletsch, seu amor, humildade e simplicidade, me inspiraram a ser uma pessoa do bem!

E em especial ao meu irmão Stefano Pletsch,
Sangue do meu sangue!

AGRADECIMENTO

Agradeço a DEUS, pela saúde, força e determinação na concretização de mais uma etapa da minha vida. À minha padroeira Nossa Senhora do Caravaggio, pela proteção divina, por guiar-me, fazendo seguir sempre na melhor direção.

Agradecimento especial, ao meu orientador, mentor e amigo, professor Claudio. Pela amizade, confiança e conhecimento transmitido, sem dúvida, exemplo de profissional.

Sou particularmente grato ao professor Mauricio Mancio, pela voluntariedade para realização da coleta da cinza, e dos ensinamentos transmitidos em sala de aula.

À professora Marlova, obrigado pelas contribuições, sugestões e apoio prestados em sala de aula, para a melhoria dessa pesquisa.

Meu obrigado a COOPERCANA, pela doação do material estudado. Indústria que gentilmente mostrou-se interessada em auxiliar, no que fosse preciso sobre o processo, o rejeito e destinação atual da cinza.

Ao engenheiro Emerson da empresa BRITASINOS, que gentilmente cedeu o agregado miúdo utilizado no programa experimental.

Ao laboratório LCVmat, Emanuele e, em especial, à Aline, pelas caracterizações físicas e químicas.

Ao laboratório de materiais da construção civil, pela colaboração e apoio prestados durante as atividades experimentais, David, Jeremias, Leonardo, em especial ao Igor e André, que sempre mostraram-se prontificados a auxiliar ou esclarecer dúvidas.

Aos amigos que fiz e que mantive mais contato, de modo especial, Luiz, Jéssica, Ricardo e Eduardo.

E um carinho muito grande na dedicação e esforço das bolsistas Monique, Camila e Thais, meu muito obrigado.

Quero agradecer pelos técnicos da maquetaria, em especial ao seu Airton, que confeccionaram as formas em MDF para serem utilizadas no programa experimental.

RESUMO

O cimento Portland é reconhecido como um importante produto na construção civil em todo o mundo, porém, na produção do clínquer, há uma grande emissão de CO₂ na atmosfera. Objetivando a redução desses índices, pesquisas estão sendo realizadas para a utilização de materiais alternativos e com propriedades similares ao cimento Portland. O Brasil é o maior produtor de cana-de-açúcar do mundo, sendo que com o beneficiamento dessa planta, são gerados os produtos de açúcar, etanol e derivados. O processo de beneficição gera como resíduo o bagaço da cana-de-açúcar. O processo de queima do bagaço gera uma cinza, conhecida como cinza do bagaço da cana-de-açúcar (CBC). A cinza, na maioria dos casos, é rica em sílica, podendo estar presente na forma cristalina, que tem propriedades inertes e não atrativas para uso por substituição ao cimento e sim por substituição ao agregado miúdo; mas também na forma amorfa, que em contato com compósitos cimentícios reage com os produtos de hidratação, característica de uma pozolana. Neste trabalho são avaliadas as propriedades mecânicas e a durabilidade de argamassas com teores de substituição de cimento Portland por CBC de 5%, 10%, 20% e 30% com 3 relações água/aglomerante: 0,4, 0,5, 0,6. A pesquisa busca avaliar a resistência mecânica e durabilidade desse concreto com CBC, com ênfase na carbonatação. Para isso, foram realizados ensaios de carbonatação acelerada, com o objetivo de avaliar o comportamento da CBC nos novos compósitos cimentícios. Conclui-se que a cinza auxilia na melhoria das propriedades mecânicas, por efeitos pozolânicos e pelo efeito fíler, no teor de até 20% de substituição. A frente de carbonatação para os teores de substituição de até 20%, sofre uma diferença irrisória em relação a referência. O teor de 30% apresentou uma resistência mecânica e uma maior carbonatação comparado aos demais.

Palavras-chave: Cinza do Bagaço da Cana-de-Açúcar (CBC). Pozolanas. Carbonatação.

ABSTRACT

Portland cement is recognized as an important construction product worldwide, but in clinker production there is a high CO₂ emission in the atmosphere. In order to reduce these rates, research has been carried out to use alternative materials, similar to Portland cement. Brazil is the largest producer of sugar cane in the world, and with the processing of this plant, the products of sugar, ethanol and derivatives are generated. The beneficiation process generates sugarcane bagasse as waste. The bagasse burning process generates an ash, known as sugarcane bagasse ash (SBA). The ash, in most cases, is rich in silica and may be present in crystalline form, having inert properties and not being attractive for its replacement by cement but rather by replacement of fine aggregate, but also in amorphous form, which in contact with cementitious composites reacts with hydration products, characteristic of a pozzolan. In this study, the evaluation of the mechanical properties and durability of reference mortar and with SBA substitution contents of Portland cement of 5%, 10% 20% and 30% with 3 water / binder ratios: 0.4, 0.5 0.6. The research aims to evaluate the mechanical strength and durability of this concrete with SBA, with emphasis on carbonation. For this, accelerated carbonation tests had been performed, evaluating the behavior of SBA in the new cementitious composites. It is concluded that the ash helps in the improvement of mechanical properties, by pozzolanic effects and by the filler effect, in the content of up to 20% of substitution. The carbonation front for substitution contents of up to 20% suffers a slight difference from the reference. The 30% content presented a mechanical resistance and a higher carbonation compared to the others.

Keywords: Sugarcane bagasse ash (SBA). Pozzolans. Carbonation.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Coloração de diferentes tipos de cinzas	40
Figura 2 - Influência da temperatura na atividade pozolânica	42
Figura 3 - Morfologia das partículas fibrosas.....	45
Figura 4 - Microscopia sem moagem e com moagem de 50 min	46
Figura 5 - Esquema do efeito fíler	68
Figura 6 - Três fases de carbonatação do hidróxido de cálcio	73
Figura 7 - Fluxograma das etapas de caracterização da cinza	85
Figura 8 - Vista externa da caldeira.....	86
Figura 9 - Processo de lavagem de gases	87
Figura 10 - Depósito da cinza na Coopercana	87
Figura 11 - Moinho de bolas de eixo horizontal.....	89
Figura 12 - Micrografia com possível evidência de capilares da cana	94
Figura 13 - Micrografia com diferentes tipos de partículas	94
Figura 14 - Corpos de provas em sazonalidade em balagens impermeáveis.....	99
Figura 15 - Acondicionamento das amostras na câmara de carbonatação.....	100
Figura 16 - Modelo de selagem dos corpos de provas para carbonatação	101
Figura 17 - Visualização dos corpos de prova após aspersão de fenolftaleína.....	102
Figura 18 - Identificação das imagens.....	102
Figura 19 - Porta fotos para fotografar as amostras	103
Figura 20 - Análise computacional da área carbonatada	103

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1 - Distribuição granulométrica do cimento.....	82
Gráfico 2 - Distribuição granulométrica da areia	84
Gráfico 3 - Distribuição granulométrica da areia dos grãos passantes na #200.....	84
Gráfico 4 - Distribuição granulométrica da CBC.....	93
Gráfico 5 - Resistência à compressão ao longo do tempo na relação a/agl 0,4.....	107
Gráfico 6 - Resistência à compressão ao longo do tempo na relação a/agl 0,5.....	108
Gráfico 7 - Resistência à compressão ao longo do tempo na relação a/agl 0,6.....	109
Gráfico 8 - Influência da relação a/agl na resistência mecânica aos 28 dias	110
Gráfico 9 - Influência da relação a/agl na resistência mecânica aos 63 dias	111
Gráfico 10 - Carbonatação ao longo do tempo para relação a/agl 0,4	114
Gráfico 11 - Carbonatação ao longo do tempo para relação a/agl 0,5	115
Gráfico 12 - Carbonatação ao longo do tempo para relação a/agl – 0,6	116
Gráfico 13 - Carbonatação para diferentes teores de água/aglomerante no tempo	117

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 - Resíduos gerados pela cana-de-açúcar.....	33
Quadro 2 - Variáveis do programa experimental.....	80

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Tempo e temperaturas de queima, tipos de moinhos e tempos de moagem encontrados na bibliografia	48
Tabela 2 - Local de coletas das cinzas e o teor de sílica presente na amostra	53
Tabela 3 - Exigências físicas e químicas para material pozolânico.....	58
Tabela 4 - Teores de substituição, material substituído, tipo de cimento utilizado	64
Tabela 5 - Caracterização física do cimento CP V -ARI	81
Tabela 6 - Caracterização química do cimento CP V -ARI.....	81
Tabela 7 - Dimensão das partículas do cimento.	82
Tabela 8 - Caracterização granulométrica da areia.....	83
Tabela 9 - Atividade pozolânica da CBC com o cimento aos 28 dias	90
Tabela 10 - Classificação do método proposto por Lùxan et al. (1989)	90
Tabela 11 - Resultados dos ensaios de condutividade elétrica.....	91
Tabela 12 - Resultados dos elementos químicos presente na CBC	91
Tabela 13 - Resultados de Perda ao Fogo.....	92
Tabela 14 - Dimensão das partículas da CBC	92
Tabela 15 - Resumo do material utilizado para moldagem dos corpos de prova.	95
Tabela 16 - Ensaio no estado fresco das argamassas.....	96
Tabela 17 - Variáveis para avaliação das propriedades mecânicas.....	97
Tabela 18 - Variáveis para avaliação da carbonatação em argamassas com CBC ..	97
Tabela 19 - Resultados da resistência à compressão axial média.....	106
Tabela 20 - Resultados da média da carbonatação acelerada (mm).....	113

LISTA DE SIGLAS

a/c	Fator água/cimento
a/agl	Fator água/aglomerante
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ACBC	Areia de cinza de bagaço de cana-de-açúcar
Al	Alumínio
Al ₂ O ₃	Óxido de alumínio
ARI	Alta resistência inicial
BCA	Bagaço de cana-de-açúcar
°C	Graus Celsius
°C/m	Graus Celsius por minuto
C ₃ A	Aluminato tricálcico
C ₄ AF	Ferroaluminato de cálcio hidratado
C ₂ S	Silicato dicálcio
C ₃ S	Silicato tricálcio
C-S-H	Silicato de cálcio hidratado
CaCO ₃	Carbonato de cálcio
Ca(OH) ₂	Hidróxido de cálcio
CBC	Cinza de bagaço cana-de-açúcar
CBC IN	Cinza de bagaço cana-de-açúcar in natura
CBC M	Cinza de bagaço cana-de-açúcar moída
CBC R	Cinza de bagaço cana-de-açúcar requeimada
CBC RM	Cinza de bagaço cana-de-açúcar requeimada e moída
cm	Centímetro
CO ₂	Dióxido de carbono
CO ₃	Carbono
CONAB	Companhia Nacional de Abastecimento
CP	Cimento Portland
CP-V	Cimento Portland tipo V
DEPEC	Departamento de pesquisas e estudos econômicos
DRX	Espectrometria de Difração de Raios X

DTG	Curva derivada de Termogravimetria
Fc	Resistência média à compressão aos 28 dias
Fe ₂ O ₃	Óxido de ferro
FRX	Espectrometria de Fluorescência de Raios X
g	Gramas
h	Hora
IAP	Índice de atividade pozolânica
IBRACON	Instituto Brasileiro do Concreto
Itt FUSE	Instituto Tecnológico em Ensaios e Segurança Funcional
Kg	Quilograma
L	Litros
LASID	Laboratório de Siderurgia
LCVM	Laboratório de Caracterização e Valorização de Materiais
LCM	Laboratório de Matérias de Construção Civil
ΔmS/cm	Variação de miliSiemens por centímetro
m	Metro
min	Minuto
MPa	MegaPascal
μm	Micrômetro
NBR	Norma técnica brasileira
PF	Perda ao fogo
R\$	Reais – Unidade atual de moeda brasileira
Si	Silício
SiO ₂	Dióxido de silício
TG	Termogravimetria ou análise termogravimétrica
UDOP	União dos produtores de bioenergia
UFRGS	Universidade Federal do Rio Grande do Sul
UNISINOS	Universidade do Vale do Rio dos Sinos

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	29
1.1 JUSTIFICATIVA	30
1.2 OBJETIVOS	31
1.2.1 Objetivo Geral	31
1.2.2 Objetivos Específicos	31
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	33
2.1 GERAÇÃO DE RESÍDUOS DO CULTIVO DA CANA-DE-AÇÚCAR.....	33
2.1.1 Geração da Cinza do bagaço da Cana-de-Açúcar	37
2.1.1.1 Influência do Processo de Queima do Bagaço na Qualidade da Cinza	38
2.1.1.2 Processo de Moagem.....	43
2.1.2 Teor de Sílica e Superfície Específica	51
2.1.3 Pozolanidade	55
2.2 APLICAÇÕES DA CBC NA CONSTRUÇÃO CIVIL.....	62
2.2.1 Efeitos do Uso de CBC no Estado Fresco	66
2.2.2 Efeitos do Uso de CBC no Estado Endurecido	68
2.3 DURABILIDADE DE COMPÓSITOS CIMENTÍCIOS COM CBC	70
2.3.1 Processo de Carbonatação	71
2.3.2 Carbonatação em Compósitos Cimentícios com CBC	74
3 MATERIAIS E MÉTODOS	79
3.1 CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS	80
3.1.1 Cimento	80
3.1.2 Agregado Miúdo	83
3.1.3 Água	85
3.1.4 Aditivo Super Plastificante	85
3.1.5 Cinza do Bagaço da Cana-de-Açúcar	85
3.2 MÉTODOS PARA CARACTERIZAÇÃO DA CINZA.....	88
3.2.1 Índice de Atividade Pozolânica	89
3.2.2 Condutividade Elétrica	90
3.2.3 Fluorescência de Raio X – FRX	91
3.2.4 Perda ao Fogo	92
3.2.5 Distribuição Granulométrica	92
3.2.6 Análise de Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV)	93

3.3 PRODUÇÃO DOS CORPOS DE PROVA	95
3.3.1 Produção dos Corpos de Prova para Ensaios Mecânicos	96
3.3.2 Produção dos Corpos de Prova para Ensaios de Durabilidade	97
3.4 CURA	98
3.5 SAZONAMENTO	98
3.6 CÂMARA DE CARBONATAÇÃO	100
4 APRESENTAÇÃO, ANÁLISE E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS	105
4.1 PROPRIEDADES MECÂNICAS	105
4.1.1 Análise da Resistência para cada Relação Água/Aglomerante	107
4.1.2 Influência da Relação Água/Aglomerante na Resistência a Compressão Axial	110
4.2 CARBONATAÇÃO ACELERADA	112
4.2.1 Análise da Profundidade de Carbonatação Acelerada no Tempo	112
4.2.2 Influência da Relação Água/Aglomerante na Profundidade de Carbonatação	117
5 CONCLUSÃO E CONSIDERAÇÕES FINAIS	119
5.1 CONCLUSÕES	119
5.2 CONSIDERAÇÕES FINAIS	121
5.3 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	122
REFERÊNCIAS	123
APÊNDICE A - GRANULOMETRIA DA AREIA, CIMENTO E CINZA DO BAGAÇO DA CANA-DE-AÇÚCAR	133
APÊNDICE B - ENSAIO GRANULOMÉTRICO AMOSTRA 1 AREIA	135
APÊNDICE C – ÍNDICE DE ATIVIDADE POZOLÂNICA COM CIMENTO	137
APÊNDICE D - RESISTÊNCIA MECÂNICA	139
APÊNDICE E - SAZONAMENTO	145
APÊNDICE F - RESULTADOS DE CARBONATAÇÃO ACELERADA	147
ANEXO A - GRANULOMETRIA CINZA DO BAGAÇO DA CANA-DE-AÇÚCAR ..	155
ANEXO B - GRANULOMETRIA AREIA	157
ANEXO C - GRANULOMETRIA CIMENTO	159

1 INTRODUÇÃO

O cimento Portland é dos materiais mais utilizados no mundo no que se refere à construção civil. No entanto, no seu processo de fabricação, são consumidos recursos naturais não renováveis e energia, o que faz com que a produção de cimento seja responsável por cerca de 7% das emissões globais de CO₂, de acordo com dados World Business Council For Sustainable Development – WBCSD (2018).

Com uma grande demanda desse material, para o desenvolvimento de estradas, edifícios, infraestruturas de cidade, portos e afins, estudos relacionados a cimentos alternativos e adições minerais vêm sendo realizados para substituir parte desses componentes por outros com menor impacto ambiental (PAIVA 2016).

O Brasil é considerado o maior produtor de cana-de-açúcar, segundo dados do Departamento de Pesquisas e Estudos Econômicos (DEPEC, 2014). Segundo dados do Companhia Nacional de Abastecimento (CONAB, 2019), a produção foi de 620,44 milhões de toneladas de cana-de-açúcar na safra 2018/19, em uma área de 8,59 milhões de hectares. O Brasil teve um decréscimo de 2% na produção de cana-de-açúcar, devido à redução na área de produção, reduzindo em 1,6% a produção em relação à safra 2017/2018. O percentual de produção de açúcar na safra 2018/2019 foi estimado 29,04 milhões de toneladas, e a produção de etanol corresponde a 66,28 bilhões de litros produzidos (CONAB, 2019).

O processo de beneficiamento da cana-de-açúcar - gerando derivados de açúcar, álcool, energia - acaba gerando resíduos da própria matéria prima, sendo um deles o bagaço da cana-de-açúcar (BCA), onde, após o seu processo de beneficiamento para geração dos derivados, é utilizado como fonte de energia em queima nas caldeiras, gerando, após a sua queima, resíduo de cinza do bagaço da cana-de-açúcar, segundo Câmara (2015). Para cada tonelada de cana-de-açúcar, são gerados cerca de 260 kg (26%) de bagaço com cerca de 50% de umidade. Para cada tonelada de bagaço queimado, há entre 5 kg e 7kg de cinza residual, após a combustão (CORDEIRO, 2006; PELLEGRINE, 2009). A cinza residual ainda não tem uma destinação correta, não sendo agregado valor econômico a esse rejeito, que é lançado de volta aos canaviais e que não oferece nutrientes ao solo.

Uma possível alternativa de reciclagem da cinza do bagaço da cana-de-açúcar ocorre na forma de adição ao cimento Portland, na fabricação de concretos e argamassas. Segundo Cordeiro (2006), a reatividade da cinza do bagaço da cana-

de-açúcar, que pode apresentar-se no estado amorfo quando o processo de queima é realizado com um adequado controle de qualidade, é comprovada em diversas pesquisas.

Almeida (2013) estabeleceu uma nomenclatura para dois tipos de cinzas residuais, em relação a sua aplicação em concretos e argamassas, que é adotada nesse trabalho: a cinza do bagaço da cana-de-açúcar (CBC) para materiais com aplicação a substituição ou adição por cimento Portland, possuindo características de material pozolânico e de areia de cinza da cana-de-açúcar (ACBC) para materiais com substituição de agregado miúdo (areia), por ser caracterizado como material inerte.

Segundo Saraiva (2017), a moagem da cinza de bagaço de cana-de-açúcar é mais fácil do que a moagem do clínquer de cimento Portland, o que colabora para um baixo custo de trituração da cinza e geralmente resulta em uma granulometria mais fina do que a encontrada em calcários e no clínquer do cimento Portland moídos. Entretanto, há queda na resistência mecânica quando utilizada em substituição ao cimento.

Apesar de existirem inúmeras pesquisas sobre o tema, ainda há fatores que não são bem compreendidos e que necessitam de esclarecimentos para que a CBC possa efetivamente ser usada comercialmente. Este trabalho complementa as informações já existentes sobre o uso da cinza do bagaço da cana-de-açúcar e busca avaliar a resistência mecânica e a durabilidade do concreto com substituição de cimento por CBC, verificando a durabilidade com a utilização dessa cinza, com ênfase na carbonatação em concretos com CBC.

1.1 JUSTIFICATIVA

Com a produção da indústria sucroalcooleira e o seu beneficiamento para obtenção do açúcar, do etanol, e demais produtos derivados, tem-se alguns resíduos de sua geração, entre eles o bagaço, que é amplamente utilizado na própria indústria para cogeração de energia no processo de queima do bagaço em caldeiras, sendo gerado um resíduo final, que é conhecido como cinza do bagaço da cana-de-açúcar (CBC). Estima-se que a geração do bagaço na safra de 2014/15 seja em torno de 174.715 milhões toneladas, após o processo de combustão, cerca de 0,7% em massa deste se transforma em cinza, o que resulta em

aproximadamente 1,2 milhões de toneladas de cinza residual a cada safra. Essa cinza representa um passivo ambiental e tem potencial para uso como adição pozolânica em cimentos Portland.

O uso da CBC na construção civil vem sendo amplamente estudado, com ênfase na substituição de cimento Portland, uma vez que o material possui características pozolânicas ou, se a cinza possuir características inertes – sem propriedades de reação com produtos de hidratação do cimento, ser utilizada em substituição ao agregado miúdo em compósitos cimentícios de concretos e argamassas.

Todavia, há poucos estudos sobre durabilidade desses novos compósitos cimentícios, sendo necessária uma discussão sobre essa temática.

1.2 OBJETIVOS

Os objetivos da pesquisa foram divididos em objetivo geral e objetivos específicos, abordados a seguir.

1.2.1 Objetivo Geral

O objetivo geral desta pesquisa é avaliar a carbonatação de concretos com substituição de cimento Portland por cinza do bagaço da cana-de-açúcar.

1.2.2 Objetivos Específicos

Para realização do objetivo geral, foram delimitados quatro objetivos específicos:

- a) Avaliar as propriedades mecânicas dos compósitos cimentícios com CBC;
- b) Avaliar a durabilidade através de ensaios de carbonatação;
- c) Avaliar a influência do teor de CBC nas propriedades mecânicas e na carbonatação;
- d) Avaliar a influência da relação água/aglomerante nas propriedades mecânicas e na carbonatação.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Neste capítulo, apresenta-se de forma resumida um dos resíduos gerados pela indústria sucroalcooleira, em especial a cinza do bagaço da cana-de-açúcar – CBC - e suas principais destinações dentro da indústria da construção civil. São apresentados também conceitos técnicos de durabilidade de concretos e argamassas.

2.1 GERAÇÃO DE RESÍDUOS DO CULTIVO DA CANA-DE-AÇÚCAR

A cana-de-açúcar é cultivada em países com clima tropical e subtropical para obtenção do açúcar, do álcool e demais derivados. O beneficiamento desses produtos gera resíduos como o bagaço, a torta de filtros, a vinhaça, o melaço, e a ponta da cana, segundo Silva (2010). No quadro 1 estão relacionados os tipos de resíduo, a sua origem e a sua destinação atual.

Quadro 1 - Resíduos gerados pela cana-de-açúcar

Resíduo	Origem	Destino
Bagaço	Moagem da cana e extração do caldo	Cogeração de energia elétrica, adubo, produção de ração animal, produção de aglomerados ou produção de celulose
Torta de filtração	Filtração do lodo gerado na clarificação	Condicionador de solo, produção de ração animal
Vinhoto	Resíduo da destilação do melaço fermentado (para obtenção do álcool)	Uso como fertilizantes
Melaço	Fabricação do açúcar	Usado na produção do álcool
Ponta da cana	Corte da cana para moagem	*
CBC	Queima do bagaço para cogeração de energia	Usada para adubação do solo

Fonte: Adaptado de Hemerly (1999 apud FREITAS, 2005, p. 26).

Nota: * Obs.: o autor não indicou destinação para a ponta da cana, embora Pellegrini (2009) relata que a ponta da cana, após a colheita, é deixada no solo como fertilizante orgânico, mas poderia ser utilizada como ração animal ou como fonte energética nas caldeiras.

A destinação desses rejeitos, em especial a CBC, gerada através da queima do bagaço (como visto no quadro 1), é feita sem a preocupação necessária para gerar um produto com propriedades amorfas, sem muito recurso para viabilizar uma otimização e o desenvolvimento para utilizar melhor esses subprodutos (AGASSI, 2011; ALMEIDA, 2013; BARROSO, 2011; CÂMARA, 2015; CORDEIRO, 2006; FREITAS, 2005; SARAIVA, 2017; SOUSA, 2009).

O bagaço da cana-de-açúcar “in natura”, rejeito do beneficiamento de moagem, resultante da extração do caldo da cana-de-açúcar, é um resíduo sólido composto por lignina e celulose. O bagaço é composto por 45% de fibras lignocelulósicas, 50% de umidade, 2 a 3% de sólidos insolúveis e 2 a 3% de sólidos solúveis em água (ZARDO et al., 2004). O resíduo resultante do processo de trituração pode ser transformado em bagaço hidrolisado, que pode ser utilizado como ração animal ou nas caldeiras e no processo de cogeração de energia pela própria indústria sucroalcooleira (RIPOLI; RIPOLI, 2004).

Na indústria, a biomassa do bagaço pode produzir energia térmica e elétrica de forma sustentável e ambientalmente correta. Devido a essa geração de energia, o setor já vem adotando o termo sucroenergético, em virtude das indústrias produzirem o açúcar e o etanol além da bioeletricidade. Entretanto, na década de 1970, as caldeiras das usinas geravam vapor com o bagaço apenas para o consumo interno, em conjunto com a lenha, necessitando a compra de energia elétrica para o consumo interno, por ser considerada pouco eficiente (SANTOS, 2012).

A partir da década de 90, o setor sucroalcooleiro passou a ter interesse em aumentar a geração de energia, pois objetivava a venda de excedentes (SOSA-ARNAO, 2008). Houve uma reestruturação dos sistemas e, atualmente, as caldeiras e turbinas operam em alta eficiência com alto nível de pressão e temperatura, conseqüentemente, há um maior potencial energético e maior consumo de biomassa de cana, onde o bagaço deixa de ser resíduo e passa a ser fonte de energia para as termoelétricas a vapor, completando o sistema de cogeração de energia (SANTOS, 2012).

Segundo dados do União dos Produtores de Bioenergia (UDOP, 2016), o valor de comercialização do bagaço pelas usinas é, em média, de R\$ 85,00 a tonelada no ano de 2016. O valor, todavia, é muito variável, pois nos anos de 2014/15 o bagaço alcançou o valor de R\$ 150,00 a tonelada, isso devido a

remuneração de energia elétrica comercializada no mercado livre de energia, onde, atualmente, é comercializada a cerca de R\$ 25,00.

No Brasil, nos dias atuais, cerca de 95% do bagaço que são gerado no processo de moagem para extração do caldo são queimados na própria usina, com o intuito de gerar vapor nos processos de cogeração de energia, o que resulta na cinza do bagaço da cana-de-açúcar. (PAULA, 2006).

Segundo Sosa-Arno (2007), existem diversos equipamentos para a combustão do bagaço. As primeiras caldeiras eram de grelha, amplamente conhecida na literatura como ferradura, sendo pouco eficientes, onde o bagaço era incinerado em pilhas, nos quais os gases de saída não eram queimados totalmente. As caldeiras mais desenvolvidas têm um sistema de queima em suspensão, sendo o bagaço queimado em suspensão devido à injeção de ar aquecido. Nesse trabalho são abordados os principais sistemas de grelhas utilizados na indústria, Basculantes, Pin Hole, Rotativa e Vibro-fluidizada e as caldeiras com funcionamento mais desenvolvido que são as de leito fluidizado atmosférico e leito fluidizado circulante:

- a) As **grelhas basculantes** são utilizadas para outros tipos de combustíveis como carvão e lignina, sendo que esse sistema gera um alto conteúdo de cinzas e sua eficiência térmica é considerada baixa;
- b) Já as **grelhas Pin Hole** geram um baixo conteúdo de cinza, geralmente em torno de 3 a 4% misturado com o bagaço;
- c) **Grelhas rotativas** são utilizadas para queima de diversas biomassas, entre elas o bagaço, sendo que esse sistema opera com altos parâmetros de vazão, pressão e temperatura;
- d) As caldeiras equipadas com **grelha vibro-fluidizada** consistem em um equipamento nacional, e segundo a bibliografia apresentam um bom desempenho;
- e) As caldeiras de combustão em **leito fluidizado atmosférico** – AFBC – possuem uma eficiência boa para queima de carvão e rejeitos, assim como casca de arroz e pó de serragem com baixo teor de umidade. Já para o bagaço da cana, que possui um alto teor de umidade, esse sistema não é recomendado;

- f) Assim como a anterior, caldeiras a combustão em **leito fluidizado circulante** – CFBC – não são recomendadas para a queima de bagaço, apesar de gerar alto consumo de potência.

Resumidamente, o processo convencional com turbina a vapor utiliza a caldeira para produção de vapor através da queima do bagaço, esse vapor gerado aciona o turbo gerador, produzindo energia elétrica. O vapor passante na turbina é condensado cedendo calor a água e volta à caldeira, e os gases seguem para a chaminé (SOSA-ARNAO, 2007).

Na tecnologia das caldeiras com processo de combustão por leito fluidizado, o bagaço gera uma queima com dispersão no leito com partículas (areia), com contínuo movimento de insuflamento, ou seja, o ar é introduzido pelo fundo da fornalha e o bagaço é convertido em gás energético pela oxidação da temperatura alta, processo conhecido como gaseificação (PELLEGRINE, 2009).

De acordo com Batra et al. (2008) com a utilização do bagaço de cana em caldeiras à combustão em leito fluidizado, tem-se uma maior eficiência de ignificação para cogeração. Porém, a umidade e a densidade do bagaço dificultam o processo em leito fluidizado, assim como a alta quantidade de carbono é um problema para utilização dessa cinza como adição mineral.

Para a produção e para suprir a demanda do setor, Santos (2012) salienta que devem ser feitos investimentos em novas tecnologias de equipamentos de cogeração, pois as empresas do setor sucroalcooleiro ainda utilizam equipamentos ineficientes. As novas tecnologias são muito mais complexas, com sistemas nobres e com custo maior, necessitando de cuidados específicos de operação e manutenção.

A indústria sucroalcooleira, apesar da grande geração de resíduos em virtude do beneficiamento da cana-de-açúcar, possui uma destinação sustentável, ecologicamente correta e econômica para o bagaço. No entanto, o sistema de cogeração de energia, através das caldeiras gerando vapor para acionamento das turbinas, possui uma eficiência muito baixa, sendo aconselhadas mais pesquisas, novas tecnologias e mais investimentos para atingir maior eficiência na geração de energia por meio da queima de biomassa.

2.1.1 Geração da Cinza do bagaço da Cana-de-Açúcar

O bagaço de cana-de-açúcar gerado pelo setor sucroalcooleiro é considerado um subproduto em função de ser utilizado na própria usina para produção de energia. Atualmente, a capacidade de produção abastece todo o setor da indústria canavieira e, em alguns casos, a energia em excesso é comercializada com as concessionárias de energia.

As usinas responsáveis pela produção de açúcar e álcool vêm buscando o aumento da eficiência na geração de energia elétrica, auxiliando no aumento da oferta e na redução dos custos o que contribui para ampliar a sustentabilidade do setor. Diferentemente do que ocorre nas indústrias dos demais países, o setor sucroalcooleiro nacional preocupa-se com o meio ambiente e com os efeitos indesejáveis relacionados à utilização de recursos fósseis, que considera o balanço nacional do lançamento de carbono na atmosfera e os efeitos do aquecimento global (CONAB, 2019).

Essa cinza residual, proveniente do processo de cogeração de energia, necessita de uma destinação adequada. A cinza possui dióxido de silício em grande teor, geralmente acima dos 60%, que por sua granulometria fina pode desenvolver características de atividade pozolânica (ALMEIDA, 2013; BESSA, 2011; CÂMARA, 2015; CHUSILP et al. 2009; CORDEIRO et al. 2004; FREITAS, 2005; GANESAN et al. 2007; GÓES, 2016; MACEDO, 2009; MARTIRENA HERNÁNDEZ et al. 1998; PÁDUA, 2012; PAIVA, 2016; PAULA, 2006; SINGH et al. 2000; SOARES, 2016; SOUSA, 2009; VASCONCELOS, 2013; ZARDO et al. 2004;).

A etapa de geração da cinza de bagaço de cana-de-açúcar é de fundamental importância, visto que o tempo e a temperatura de queima estão diretamente ligados a possível cristalização das partículas, o que pode ocasionar a perda de capacidade das cinzas reagirem com material cimentante (CORDEIRO, 2006; PAULA, 2006; PEREIRA, 2014).

Diversos autores (CORDEIRO et al. 2008; FREITAS 2005; FRIAS et al. 2011) citam que são observadas partículas não uniformes antes da moagem, algumas maiores, de estrutura angulosa e em formato de concha, devido à contaminação por quartzo aderido à cana durante a colheita.

Freitas (2005) sugere a implementação de sistemas de controle no processo de queima nas usinas, e organização do depósito da cinza, para que o mesmo não

seja contaminado por materiais de limpeza do ambiente. A contaminação pode tornar a cinza inservível como material pozolânico.

Segundo Câmara (2015), o controle tecnológico e a padronização na geração da cinza estão relacionados às várias formas de produção em diferentes tipos de caldeiras. Um processo ideal, para a correta homogeneização do material, seria uma queima controlada juntamente com um processo de requeima; entretanto, para esse processo as usinas teriam um grande investimento para remodelar o layout dos equipamentos. Para as usinas novas, seria possível implementar algumas mudanças de projeto nos equipamentos, para que se tenha um processo padronizado, obtendo uma cinza de melhor qualidade. O autor cita que são necessários: uma queima controlada, o peneiramento e a moagem da cinza para garantir sua qualidade.

Conforme Paris et al. (2016), o atual conceito de cinza de bagaço de cana-de-açúcar possui informações esparsas em relação ao uso em compósitos cimentícios. Hoje em dia, não há utilização para a CBC na Europa e nos Estados Unidos, sendo que essa é colocada em aterro. Ainda segundo o mesmo autor, a Índia utiliza a CBC em substituição ao cimento Portland em até 35%, sendo os resultados promissores, como o aumento de resistência à compressão.

A geração da cinza do bagaço da cana-de-açúcar por meio da cogeração de energia é inevitável, mas, sugestões de autores sobre mudanças nos equipamentos, investimentos tecnológicos, controle técnicos de tempo, patamar de queima e temperatura de queima do bagaço, são requisitos fundamentais para uma cinza de bagaço de cana-de-açúcar com reatividade, baixo material orgânico, e demais requisitos estabelecidos em norma, para utilização da CBC em compósitos cimentícios.

2.1.1.1 Influência do Processo de Queima do Bagaço na Qualidade da Cinza

Para a utilização da cinza, oriunda de resíduos agroindustriais, como adição mineral é fundamental o controle de temperatura, do tempo de trituração e do tipo de moagem que será realizada no material, para que se tenha cinza amorfa, podendo apresentar com isso, propriedades pozolânicas (ANJOS et al. 2008; PAULA, 2006; MANSANEIRA, 2010). O tempo e a temperatura de queima são fundamentais para definir se o material ficará no estado amorfo ou cristalino. Essa etapa é importante

na geração da cinza, pois a cristalização desse material pode ocasionar a incapacidade da cinza reagir com o material de hidratação do cimento (BAHURUDEEN; SANTHANAM, 2015; CORDEIRO et al. 2009; GANESAN et al. 2007; OLIVEIRA, 2014; PAULA, 2006).

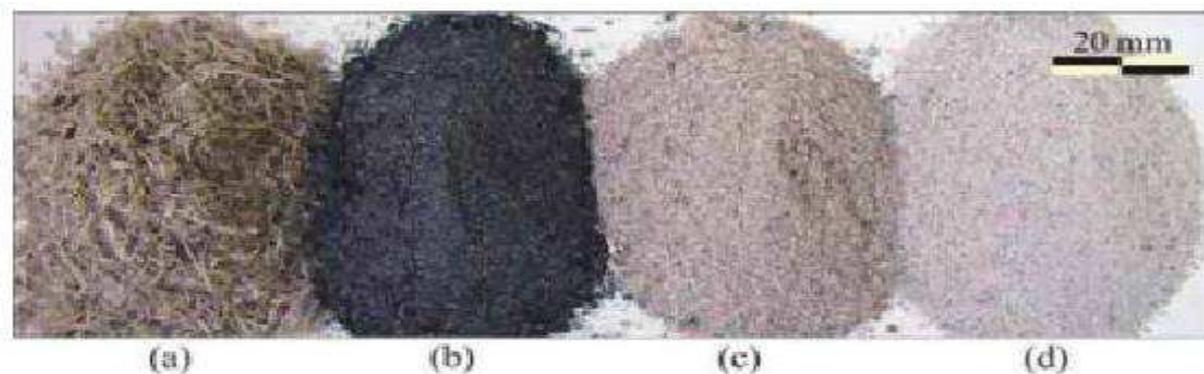
De acordo com a temperatura de queima do bagaço, as cinzas podem apresentar menor ou maior quantidade de matérias cristalinas, como cristobalita, calcita e fosfatos, influenciando na reatividade do material. Alguns autores concordam que cinzas calcinadas a 500 °C resultam em maior reatividade com o hidróxido de cálcio, porém, essas cinzas possuem uma grande quantidade de carbono, resultante da queima incompleta e de outros produtos orgânicos (PAIVA, 2016).

Segundo Paula (2006), as características das cinzas dependem da sua queima, sendo que as modificações ocorrem de acordo com a temperatura atingida. Até 100 °C ocorre a evaporação da água presente no bagaço, em torno de 350 °C inicia-se a queima do material volátil, entre as temperaturas de 400 °C a 500 °C o carbono presente é oxidado sendo que, após essa etapa, a cinza torna-se rica em sílica amorfa. Temperaturas acima de 700 °C podem levar a formação do quartzo e/ou outras formas cristalinas, sendo que em temperaturas de queima acima de 800 °C, a sílica presente na cinza é principalmente cristalina.

A cinza com alto teor de carbono possui características físicas de material fino, exigindo maior quantidade de água em concretos e argamassas, sendo essas propriedades um obstáculo para o uso de CBC em compósitos cimentícios, conforme relato de diversos autores (BARROSO, 2011; BATRA et al. 2008; CÂMARA, 2015; CORDEIRO, 2006; MACEDO, 2009; PAULA, 2006; SOUSA, 2009).

No entanto, quanto maior a temperatura de queima na caldeira e períodos de tempos maiores em exposição ao calor, a quantidade de carbono liberado tende a ser maior, resultando em uma diferença de coloração da cinza. Geralmente, cinzas residuais mais escuras indicam um maior teor de carbono; já as cinzas mais claras revelam que a queima foi completa, conforme visto na figura 1 (CORDEIRO, 2006). O teor de carbono presente na cinza pode ser medido por meio do ensaio de perda ao fogo (PF), ensaio semelhante ao feito com o cimento, conforme NBR NM 18 (ABNT, 2004).

Figura 1 - Coloração de diferentes tipos de cinzas



Fonte: Cordeiro (2006, p. 167).

Nota: a. Bagaço da cana-de-açúcar. b. Cinza com alto teor de carbono. c. Cinza com menor teor de carbono. d) Cinza gerada com combustão completa.

A cinza com alto teor de carbono possui características físicas de material fino, exigindo maior quantidade de água em concretos e argamassas, sendo essas propriedades um obstáculo para o uso de CBC em compósitos cimentícios, conforme relato de diversos autores (BARROSO, 2011; BATRA et al. 2008; CÂMARA, 2015; CORDEIRO, 2006; MACEDO, 2009; PAULA, 2006; SOUSA, 2009).

O alto teor de carbono remanescente na cinza residual, pode ser minimizado num processo de requeima, ou seja, em uma segunda queima da cinza, porém, expondo a uma temperatura mais elevada. Todavia, pode ocorrer a modificação do arranjo atômico da cinza, modificando a estrutura cristalina presente no material (COOK, 1986 apud PAULA, 2006).

Batra et al. 2008 relata que o carbono não queimado consiste em fibras porosas, com área superficial de algumas centenas de metros quadrados por grama. O carbono tem uma combinação de meso e micro poros, sendo que essas propriedades de carbono não queimado o tornam inadequado para uso em compósitos cimentícios.

Joshaghani et al. (2017) relatam que, em temperaturas de queima superiores a 800 °C, ocorre a cristalização da cinza. Os autores concluem ainda que, quando a queima ocorre sob temperatura elevada ou por um tempo prolongado, pode conter partículas negras devido à presença de carbono e sílica cristalina.

Uma má queima, queima irregular ou uma queima com temperatura não adequada, pode aumentar o teor de carbono da cinza residual. Numa cinza com alto teor de carbono, além de não se enquadrar nos requisitos da norma referente a

perda ao fogo, o carbono não participa das reações de hidratação do cimento e pode afetar o consumo de água de amassamento (PAULA, 2006).

Sousa (2009) utilizou em seus experimentos três tipos de cinza de três usinas diferentes. Na usina A, a temperatura de queima era em torno de 800 °C, na usina B em torno de 350 °C e na usina C, em torno de 850 °C. Na usina A, constatou-se a presença de *scrubber*¹; na usina B, por via úmida misturando a cinza com os restos de bagaço que passam pela grelha e, na usina C, a existência de uma peneira. O material da usina A é de cor preta, fino e bastante homogêneo. As usinas B e C, apresentam uma grande quantidade de material orgânico, conseqüentemente, uma granulometria mais grosseira.

Bahurudeen e Santhanam (2015) avaliaram o tempo de queima com as temperaturas controladas em 600 °C, 700 °C, 800 °C e 900 °C. Os autores concluíram que o processo de queima para as cinzas de bagaço de cana-de-açúcar influencia na atividade pozolânica e que a CBC queimada à temperatura de 700 °C, mostrou a atividade pozolânica máxima.

Joshaghani et al. (2017) também avaliaram tempo e temperaturas de queima para gerar uma cinza com a melhor reatividade, devido ao controle das condições de queima, como a temperatura e o tempo de queima com temperaturas de 500 °C, 600 °C, 700 °C, 800 °C e 1000° C e tempo de queima de 30 minutos. Os autores concluem que a CBC produzida com 800 °C de temperatura e tempo de duração de 30 min apresentou a melhor atividade pozolânica.

Mansaneira (2010) conclui que a temperatura de queima de 600 °C é suficiente para eliminar todo o material carbonático presente na cinza, independente dos tempos de queima. Freitas (2005) realizou seus ensaios com a CBC, verificando a queima em diferentes temperaturas, 500 °C, 600 °C e 700 °C, em diferentes tempos de queima, 4 horas, 5 horas e 6 horas de duas cinzas de usinas diferentes. Para o mesmo, a temperatura de 600 °C apresentou os melhores resultados de pozolanicidade.

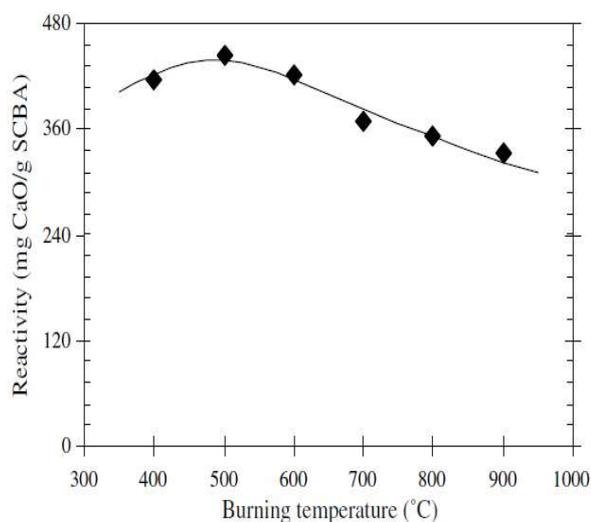
Entretanto, Frías et al. (2007) realizaram a queima do bagaço em temperaturas de 800 °C a 1000 °C e encontraram uma cinza com estrutura amorfa, que pode ser utilizada em compósitos cimentícios.

¹ Dispositivos de controle de poluição do ar que podem ser usados para remover algumas partículas e / ou gases dos fluxos de exaustão industriais.

Morales et al. (2009) relatam que a temperatura de queima tem influência direta sobre reatividade da cinza, não só influência mineralógica na composição dos resíduos, mas também na morfologia e composição de suas partículas individuais, sendo que os autores calcinaram cinzas de palha da cana-de-açúcar e de bagaço de cana a 800 °C e 1000 °C e obtiveram alta reatividade pozolânica como resultado.

Cordeiro et al. (2008) concluem que cinzas calcinadas a 500 °C obtiveram a máxima reatividade com o hidróxido de cálcio (conforme figura 2). Cordeiro (2006) realizou em sua pesquisa ensaios com diferentes temperaturas em laboratório com mufla, variando de 400 °C a 900 °C, sendo que a taxa de aquecimento de 10 °C/min e com patamar de queimas. A queima do bagaço mais adequada para produção das cinzas, foi a temperatura de 600 °C e o tempo de 3 horas, que resultou em uma cinza reativa e com baixo teor de carbono.

Figura 2 - Influência da temperatura na atividade pozolânica



Fonte: Cordeiro (2008, p. 411).

Os estudos de Soares (2010) indicam que as condições de queima – temperatura, tempo, tipo de resfriamento e circulação de ar -, influenciam as propriedades da cinza. Entre os ensaios com temperaturas de queima de 400 °C, 600 °C e 800 °C, sendo que a considerada mais eficiente foi a queima com temperatura de 600 °C, durante 2 horas com a circulação de ar. O mesmo autor avaliou a velocidade de resfriamento da cinza, com e sem circulação de ar, concluindo que a velocidade de resfriamento não afeta as características das cinzas.

Há muita diversificação entre os resultados de tempo de queima, tempo de patamar de queima e temperatura de queima entre a bibliografia. Há um consenso entre os autores sobre a falta de pesquisas para definição de tempos e temperaturas ótimos para o material possuir propriedades amorfas e reatividade. Esses fatores de material amorfo e finura da cinza estão diretamente ligados com o tempo de queima na caldeira e à temperatura, assim como a velocidade de aquecimento e o resfriamento da cinza.

2.1.1.2 Processo de Moagem

A importância da moagem é discutida por diversos pesquisadores, devido aos benefícios que esta fornece à cinza. O processo de trituração influencia na superfície específica do material, sua compactação e reatividade (BAHURUDEEN; SANTHANAM, 2015; BARROSO, 2011; CORDEIRO, 2006; FREITAS, 2005; SARAIVA, 2017; SOUSA, 2009; ZARDO et al. 2004).

Em estudo realizado por Freitas (2005), o processo de moagem das partículas da cinza do bagaço da cana-de-açúcar resultou em uma diferença na granulometria do material, aumentando a quantidade dos grãos, em consequência proporcionando uma maior superfície específica entre os grãos. Esse aumento melhorou a reatividade da cinza, proporcionou uma maior superfície de contato dos grãos e favoreceu também o efeito filler.

Paula (2006) relata que o aumento da finura decresce a partir de certo ponto, por alguns fatores, sendo que partículas muito pequenas, com elevada superfície específica, tendem a se aglomerar ainda no estado seco, necessitando uma energia de mistura alta, exigindo aditivos para aumentar a dispersão. A granulometria da cinza está diretamente ligada à reatividade química, sendo que a reação acontece com a pozolana no estado sólido, o que aumenta a taxa de reação através do processo de moagem, ou seja, aumenta a área de superfície de contato com o hidróxido de cálcio. A reatividade entre a sílica da cinza e com os hidróxidos do cimento proporciona melhoria nas propriedades mecânicas e físicas do concreto.

O tipo de moinho e o tempo de moagem vai depender das características do da cinza, segundo Cordeiro (2006). Segundo Mansaneira (2010), existe um tempo de tritamento ideal para se obter uma maior reatividade da cinza, ou seja, uma maior pozolanicidade. Após um determinado tempo de moagem, chega-se ao

máximo de pozolanicidade, e a partir daí o índice de atividade pozolânica tende a diminuir.

Soares (2010) relata que não há consenso na bibliografia sobre um tempo ótimo de trituração. Sabe-se que o tempo de moagem é fundamental para se ter uma reatividade e conseqüentemente uma maior pozolanicidade do material. Na escolha do tipo de moinho utilizado, deve-se levar em consideração as características de cada tipo de cinza. Muitos equipamentos estão disponíveis para realizar a moagem fina e ultra-fina, entre eles o moinho de bolas, de barras, de discos, de martelo, atrito, vibratório, planetário e autógeno.

Paiva (2016) realizou o trituramento da cinza do bagaço da cana-de-açúcar em moinho vibratório, ensaios com tempos de 8, 15, 30, 60, 120 e 240 minutos. O objetivo para o autor na moagem era o tamanho médio menor que 10 μm , em função de estudos com CBC mostrarem atividade pozolânica adequada e melhorias nas propriedades de materiais cimentícios. Através das curvas granulométricas, constatou que o tempo de moagem para os ensaios foi de 120 minutos.

Freitas (2005) utilizou as cinzas calcinadas a 600 °C para estudos de tempos de trituração ideal, submetendo a cinco tempos de moagem: 30 minutos, 1h, 2h, 3h, e 4h. A moagem até 3 horas proporcionou um aumento na superfície específica variando de 852,31 m^2/kg a 1760,45 m^2/kg , porém, com tempo de moagem de 4 horas, foi observada uma redução da superfície específica para 1722,36 m^2/kg , pela aglomeração das partículas. O tempo de moagem de 3 h apresentou o melhor IAP (107%), no entanto, o tempo de moagem escolhido foi de 1h, pois apresentou resistência próxima a argamassa referência (sem CBC) e por possuir um menor consumo energético se comparado aos demais tempos de moagem de 2h, 3h e 4h.

Sousa (2009) utilizou em seus ensaios o moinho de bolas, com diferentes tempos de trituração, com o objetivo de avaliar a influência do tempo na distribuição dos tamanhos das partículas, verificando a condição ideal para a CBC. Para os demais ensaios, o tempo de moagem foi padronizado em 4 horas para toda as amostras, com dimensão média das partículas atingindo 5,29 μm , granulometria ideal para maior eficiência em relação a atividade pozolânica. O teor de material amorfo e a finura são as principais características da CBC em relação a sua reatividade, ou seja, quanto mais fina e amorfa, mais reativa será a CBC.

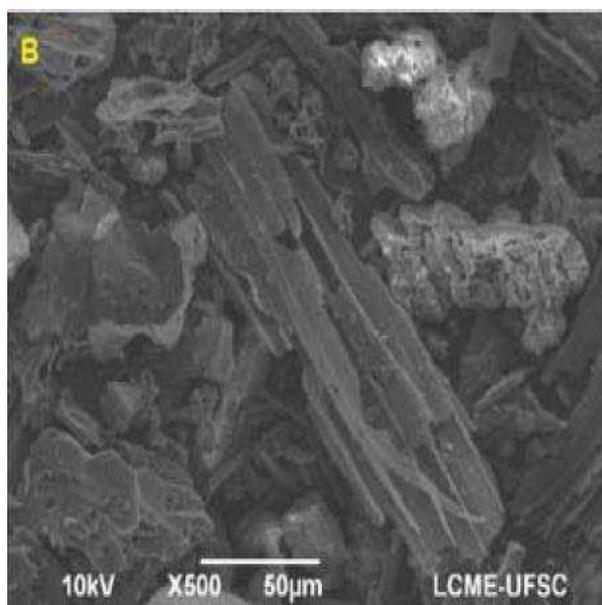
Câmara (2015) realizou a moagem em moinho de bolas, em tempos de 10 minutos e três horas. O curto período de trituramento, tem como objetivo

homogeneizar a cinza e o tempo maior, de promover uma maior reatividade ao material, diminuindo a superfície específica, melhorando o empacotamento. Realizou também um processo de requeima da cinza, durante 3 horas à 300 °C e mais 3 horas por 600 °C, com o objetivo de diminuir o material orgânico remanescente da combustão incompleta e promover a atividade pozolânica, em contrapartida, verificou-se um maior consumo energético com a requeima.

Pereira (2014) constata, através de imagens de micrografias representadas na mesma escala, a cinza residual (figura 5.a) e a cinza moída por 50 minutos (figura 5.b), sendo a diminuição das partículas e a alteração da textura das cinzas, causada pelo processo de moagem. As partículas apresentam formatos irregulares e superfícies ásperas

Câmara (2015) verificou por meio de ensaio de microscopia eletrônica de varredura (MEV), que a estrutura é caracterizada por elementos fibrilares e porosos (figura 3). Comparando tempos de moagem, o autor conclui que para moagem de 3 horas, os elementos fibrilares foram rompidos, apresentando partículas menores.

Figura 3 - Morfologia das partículas fibrosas

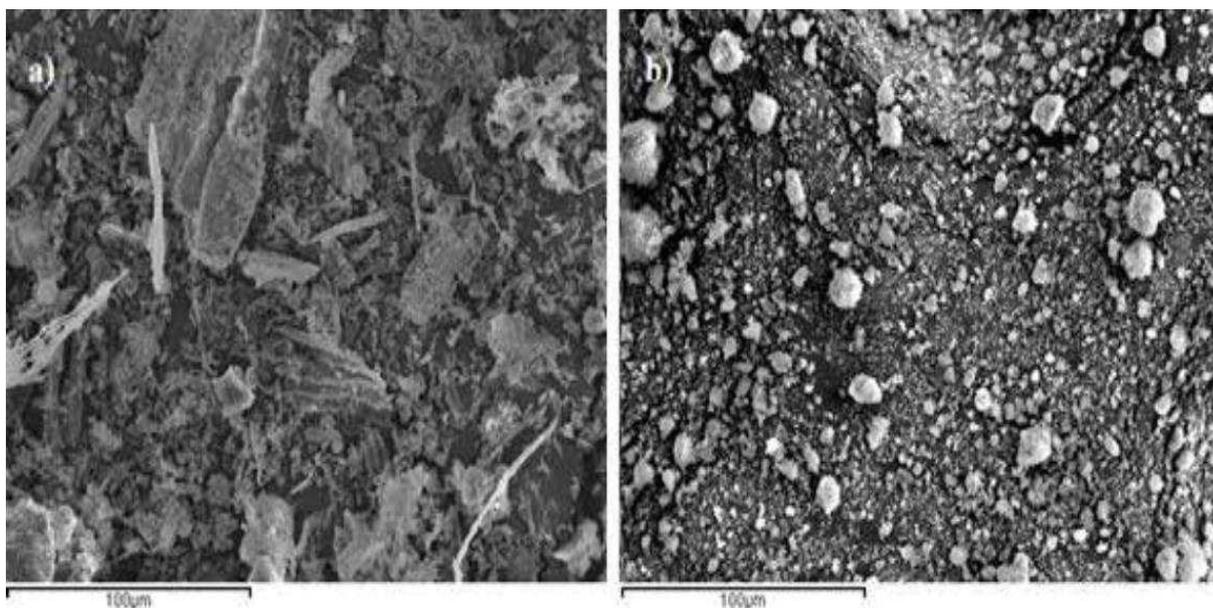


Fonte: Câmara (2015, p. 109).

Nota: Aumento de 500x.

Moraes (2015) realizou um processo de moagem num período de 50 minutos, resultando numa menor granulometria, e em uma partícula mais esférica, comparado a cinza residual de MEV (figura 4.a e 4.b).

Figura 4 - Microscopia sem moagem e com moagem de 50 min



Fonte: Moraes (2015, p. 52).

Nota: Não citou aumento. a. Microscopia cinza residual. b. Com moagem de 50 min.

Macedo (2009) realizou ensaio granulométrico sem moagem e com 4 tempos de moagem, de 20, 30, 40 e 50 minutos, sendo que a dimensão média das partículas reduziu pela metade apenas com 20 minutos de trituração. Conforme os resultados de superfície específica, índice de finura e distribuição granulométrica, o autor adotou o tempo de 20 minutos de moagem da cinza como sendo o tempo ideal para a aplicação em argamassas por melhorar a uniformidade dos grãos, reduzir a dimensão média das partículas e por ser o menor tempo estudado, já que o processo consome energia, o que se transforma em custo adicional.

Percebe-se que o tipo de moinho e o tempo de moagem variam em função do tipo de cinza e do autor da pesquisa, resultando numa CBC moída com diferentes características morfológicas e dimensionais.

Na revisão bibliográfica realizada referente ao processo de queima, tempos de queima do material, tipos de moinho e tempos de moagem, foram analisados diversos métodos que autores estudaram para obter uma cinza com maior teor de sílica amorfa, menor superfície específica e o menor teor possível de materiais orgânicos.

A tabela 1 resume as temperaturas utilizadas, o tempo de queima, o tipo de moinho empregado para moagem da cinza e os tempos de trituração empregados na caracterização da cinza do bagaço da cana-de-açúcar. Observa-se que não existe

um consenso na bibliografia sobre a temperatura e tempo de queima ideal para o bagaço, para que a cinza resultante resulte em material no estado amorfo. Porém, a maioria dos autores trabalhou com temperaturas de queima entre 500 °C e 800 °C, com o objetivo de diminuir o material orgânico da cinza e promover a atividade pozolânica.

Tabela 1 - Tempo e temperaturas de queima, tipos de moinhos e tempos de moagem encontrados na bibliografia

(continua)

Autor	Ano	Temperatura de queima (°C)	Tempo de queima	Tipo de Moinho	Carga	Carga de amostra	Tempo
Zardo et al.	2004	1000 °C	4h	Cargas esféricas de aço	**	**	1,5 h e 3h
Freitas	2005	600 °C	5 h	Planetário	**	130g	30 min, 1h*, 2, 3, e 4h
Cordeiro	2006	400 °C, 500 °C, 600 °C, 700 °C, 800 °C e 900 °C	3h, 6h	- Bolas - Rotativo - Vibratório c/ alumina - Vibratório c/ aço	Bolas: 5 L Vibratório: 16,5 L	Bolas – 2,5 L Vibratório - 8 L	Bolas: 30, 60 min, 120 min, 240 min, 480 min e 960 min. Rotativo, Vibratório: 8, 15, 30, 60, 120 e 240 min
Paula	2006	700 °C	3 h	Bolas	**	1,5	11
Macedo	2009	280 °C a 320 °C	**	Bolas	52,5 Kg	5 Kg	20 min
Sousa	2009	800 °C	**	Bolas	10 kg	2 kg	4
Mansaneira	2010	600 °C	6 h	Bolas	**	**	1 h e 2 h

Autor	Ano	Temperatura de queima (°C)	Tempo de queima	Tipo de Moinho	Carga	Carga de amostra	Tempo
Poggiali	2010	600 °C a 800 °C	**	Bolas	18,84 Kg	**	70 min
Soares	2010	600 °C	3 h	Bolas	18,84 Kg	**	12 h
Barroso	2011	780 °C a 800 °C	52 h	Bolas	800 20 mm 100 de 25 225 de 30 20 de 38	CBCA1- 0,95 kg CBCA2- 2,45 kg	1, 2, 4* e 8 horas.
Bessa	2011	**	**	Almofariz/ pistilo	**	**	3 min
Pádua	2012	700 °C	90 mim	Bolas	**	1 kg	**
Almeida	2013	750 °C a 800 °C	**	Almofariz/ pistilo	**	150 g	3 min
Castaldelli	2013	650 °C	2 h	Bolas	52,5 Kg	5 Kg	
Sampaio	2013	900 °C	**	***	***	***	***
Santos	2013	650 °C	3 h	Rotativos	**	**	24 h

Autor	Ano	Temperatura de queima (°C)	Tempo de queima	Tipo de Moinho	Carga	Carga de amostra	Tempo
Vasconcelos	2013	600 °C, 700 °C 800 °C	3 h	Bolas	**	**	**
Oliveira	2014	**	**	Facas do tipo willye Vibratório	**	**	Vibratório 6 h
Pereira	2014	**	**	Bolas	52,5 Kg	5 Kg	50 min
Câmara	2015	850 °C a 1000 °C R 600 °C – 3 h		Bolas	**	**	10 min e 3 h
Góes	2016	300 °C*, 400 °C, 500 °C e 600 °C	3 h	Bolas	3 kg	1,3 kg	7 h
Paiva	2016	600 °C e 900 °C	4 h	Vibratório	22 L	11 L	8, 15, 30, 60, 120* e 240 min
Santos	2017	500 °C, 600 °C 700 °C	**	**	**	**	**
Joshaghani et al	2017	500°, 600°, 700°, 800 °C e 1000 °C	30 min	Bolas	**	**	4, 8, 10, 12, 14 e 16 min
Saraiva	2017	CBC R 600 °C	2 h	Planetário	**	**	2, 4, 6, 8, 10 e 12 min

Fonte: Elaborada pelo autor.

Nota: * Valores usados. ** Não informado. *** Não realizado.

Para alguns autores, a temperatura de queima do bagaço da cana-de-açúcar a 600 °C apresentou uma quantidade de sílica amorfa ideal, assim como uma baixa quantidade de carbono, enquadrando a CBC como pozolana (CORDEIRO, 2006; CORDEIRO et al. 2008; CORDEIRO et al. 2009; FREITAS, 2005; GANESAN et al. 2007; PAULA, 2006; PAYÁ et al. 2002; SOARES, 2010).

Ainda sobre os dados apresentados na tabela 1, pode-se constatar que o moinho mais utilizado para moagem da CBC é o moinho de bolas. Esse moinho é amplamente utilizado nas pesquisas, em virtude de possuir uma maior eficiência em comparação a outros tipos de moenda. Sua eficiência está ligada à menor energia gasta para se obter a distribuição granulométrica desejada.

2.1.2 Teor de Sílica e Superfície Específica

As propriedades físicas e químicas da cinza podem variar em razão de vários fatores: da procedência, dos tipos de cana-de-açúcar cultivadas, diferentes formas de colheita, diferentes solos, fertilizantes e herbicidas (PAULA, 2006).

Há duas possíveis formas do silício estar presente na planta da cana-de-açúcar: a primeira por absorção do silício do solo pelas raízes e após a saída da água por transpiração, deposita-se na parede externa da epiderme como sílica gel; a segunda forma de sílica é a suposta areia de quartzo, da lavoura, onde não foi removida totalmente pela lavagem, no processo da cana-de-açúcar (OLIVEIRA, 2014).

Cordeiro (2006) sugere para cinza residual do bagaço da cana-de-açúcar uma moagem para elevar a reatividade, aumenta a superfície específica e proporciona uma maior homogeneização do material, visto que a CBC residual possui granulometria variável em função do processo de queima não possuir classificação ou uma padronização.

Segundo Caldas et al. (2000) e Cordeiro (2006), a cinza do bagaço da cana-de-açúcar possui características físico-químicas semelhantes à cinza da casca de arroz, sendo que esse resíduo industrial já é utilizado como adição pozolânica. A CBC possui reduzida granulometria, elevada porosidade e, principalmente, sua composição química com grande quantidade de silicatos e aluminatos, podem ser incorporados ao cimento Portland como adição.

Vasconcelos (2013) relata que a grande quantidade de SiO_2 na cinza não garante que ela vai reagir com a Portlandita (CH) presente no cimento Portland para formar silicato de cálcio hidratado (C-S-H). Para que a cinza do bagaço de cana-de-açúcar seja considerada uma adição mineral, além do elevado teor de SiO_2 é necessária a moagem, pois com maior área superficial, mais reativa será a cinza, pois terá maior área de contato entre a cinza e a pasta, gerando vários pontos de nucleação e melhorando o empacotamento da pasta.

Paula (2006) obteve em seus resultados um teor de 84% de sílica e 5% de carbono. A sílica apresentava-se tanto na fase amorfa, como na fase cristalina. A sílica presente na CBC, além de estar no estado amorfo, precisa ter reatividade para que possa reagir com os produtos de hidratação do cimento.

Paiva (2016) relata que materiais de sílica e/ou alumina reativas apresentam reações químicas secundárias, formando produtos hidráulicos estáveis com propriedades aglomerantes que consolidam a matriz cimentícia. Essas reações ocorrem com matérias com propriedades pozolanas moídas finamente, em presença de água e com produtos de hidratação do cimento.

Soares (2010) realizou ensaios da composição química da cinza, do bagaço lavado e do não lavado. Os dados mostram que o teor de sílica no bagaço lavado é três vezes menor do que no bagaço não lavado. A autora constatou que a possível diferença na composição química está diretamente relacionada à contaminação de sílica proveniente do solo e que o teor de sílica amorfa presente na cinzas é praticamente inexistente e que seu efeito estaria relacionado ao aumento da compacidade.

Para que um material seja classificado como pozolânico, a NBR 12653 (ABNT, 2014) estabelece exigências físicas e químicas, como o valor mínimo de 50 % para a soma dos teores de $\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3$ para classe E, e o mínimo de 70% para classe N e C.

Realizou-se um levantamento bibliográfico em relação ao teor de sílica obtido pelos autores (tabela 2), assim como o local de coleta nas usinas e o país. Analisando os dados da tabela, é possível constatar que para maioria das CBC tem-se a classificação com teores mínimos estabelecidos em norma, podendo ser enquadrados como material pozolânico, cinza com teores abaixo dos estabelecidos em norma, podem ser utilizadas como ACBC ou, caso moído finamente, como fíler.

Tabela 2 - Local de coletas das cinzas e o teor de sílica presente na amostra

(continua)

Autor	Ano	Local de coleta	País	Teor de SiO₂ (%)
Macedo	2009	Destilaria Generalco, SP	Brasil	94,11
Bessa	2011	Usina A*, SP	Brasil	CBC A – 93,5
		Usina B*, SP		CBC B – 62,7
		Usina I*, SP		CBC I – 96,2
		Usina J*, SP		CBC J – 88,2
Góes	2016	*, PE	Brasil	89,2
Vasconcelos	2013	*, PE	Brasil	89,2
Paula	2006	Uracânia, MG	Brasil	83,71
Almeida	2013	Usina Diamante – Jaú, SP	Brasil	80,2 CBC IN 80,8
Pereira	2014	COSAN, SP	Brasil	78,6
Cordeiro	2006	São João da Barra, RJ	Brasil	78,34
Paiva	2016	AGROVALE	Brasil	78
Chusilp et al.	2009	*	Tailândia	77,37 70,64 60,67 54,45
Zardo et al.	2004	Araras, SP	Brasil	77,30
Câmara	2015	*, PR	Brasil	76,55 CBC IN 71,41 CBC M 10m 70,32 CBC M 3h 83,11 CBC R
Hernández et al.	1998	Vila Clara	Cuba	72,74
Frias et al.	2011	*	Brasil	69,40 66,61 55,97
Freitas	2005	Campos dos Goytacazes, RJ	Brasil	65,70
Sua-lam e Makul	2013	Singburi	Tailândia	65,26

(conclusão)

Autor	Ano	Local de coleta	País	Teor de SiO₂ (%)
Akram et al.	2009	*	Paquistão	64,44
Ganesan et al.	2007	Aranthangi-TamilNadu	Índia	64,15
Singh et al.	2000	Captainganj, Kushinagar	Índia	63,16
Sousa	2009	*	Brasil	62,68
Soares	2010	*	Brasil	62,5
Pádua	2012	Usina Alpha	Brasil	61,53 17,02
Payá et al.	2002	Ingenio Providencia	Colômbia	59,87
Joshaghani et al	2017	*	USA	54,1 – 500 °C 54,8 – 600 °C 54 – 700 °C 55,7 – 800 °C 53,4 – 1000 °C
Santos	2017	União Açucareira, Bahia	Brasil	43,9 - 500 °C 46 – 600 °C 55,45 – 700 °C
Barroso	2011	Usina Coagro.	Brasil	10,18 in natura 53,17 in natura
Sampaio	2013	*, RN	Brasil	48,17 47,57 50,01
Osinubi et al.	2009	Jimeta, Adamawa	Nigéria	41,17
Saraiva	2017	Bem Brasil	Brasil	21,10 M (moída) 40,47 - RM
Santos	2013	Canavieira S.A., MG	Brasil	37,46 40,08 34,27
Poggiali	2010	Caeté S/A	Brasil	29,69
Agassi	2011	Santa Terezinha	Brasil	Não informado
Souto	2010	USAÇUCAR	Brasil	*

Fonte: Elaborada pelo autor.

* Nota: Não informado.

Ainda sobre os dados apresentados na tabela 2, a grande maioria dos autores obtiveram cinzas do bagaço de cana-de-açúcar com uma composição química adequada em relação aos teores de dióxido de silício, podendo ser empregado como adição mineral. Todavia, as pesquisas apresentam cinzas com vários teores diferentes de dióxido de silício, mas geralmente superiores a 60%.

Na maioria das usinas da indústria sucroalcooleiras não há um controle tanto de temperatura como tempo de queima, sendo que, em altas temperaturas, o SiO_2 se cristaliza deixando de ser reativo. Sem esse controle de queima, a cinza pode ter tanto silicatos amorfos, quanto cristalinos, dificultando sua utilização como material pozolânico.

2.1.3 Pozolanicidade

As adições minerais de acordo com as propriedades físicas e químicas, são divididas em materiais cimentantes, materiais pozolânicos e não-reativos segundo Dal Molin (2005).

O **material cimentante** não utiliza, necessariamente, o hidróxido de cálcio presente no cimento Portland para formar produtos cimentantes como o C-S-H (silicato de cálcio hidratado). Porém, a hidratação é lenta e a quantidade de produtos cimentantes formada é insuficiente para aplicação do material para fins estruturais. Se o material cimentante é posto em contato com o cimento, as reações de hidratação serão aceleradas e pode-se substituir até 70% do clínquer. Para acelerar a hidratação, faz-se o uso com adição ou substituição de cimento Portland (CÂMARA, 2015; VASCONCELOS 2013).

O **material pozolânico** é um material silicoso ou sílico-aluminoso, que sozinho possui pouca ou nenhuma reação cimentícia, mas, quando finamente dividido e em presença de umidade, reage quimicamente com o hidróxido de cálcio à temperatura ambiente para formar compostos (C-S-H) que possuem propriedades cimentícias, segundo NBR 12653 (ABNT, 2014).

Já **adição mineral**² do tipo não-reativa, não possui atividade química, mas que, devido a sua granulometria com diâmetro igual ou menor do que o do cimento,

² Diferença entre aditivos - *chemical admixture* – e Adições - *mineral admixture* – que a primeira é um material que são adicionados ao concreto em pequenas quantidades, no máximo 5% em relação a massa do cimento, e a segunda, podendo substituir parte de cimento pelas adições, sendo que o objetivo das duas é de melhorar o desempenho do concreto - Cimento Itambé (2009).

promove o chamado efeito filer. Sua ação se resume a um efeito físico de empacotamento granulométrico, uma vez que possibilita o preenchimento dos vazios entre as partículas de cimento disperso, promovendo aumento na compacidade da mistura e, conseqüentemente, refinamento dos poros (CORDEIRO, 2006).

Soares (2010) relata que para uma adição possuir efeito filer deve apresentar granulometria próxima ou inferior ao cimento Portland. Em teores de substituição abaixo de 15% em relação a massa do cimento, são melhoradas as propriedades de trababilidade, massa específica, permeabilidade, exsudação e a tendência de fissuração.

As características do efeito filer podem contribuir para alterar a microestrutura da zona de transição, pois o filer pode interferir na movimentação das partículas de água, reduzindo ou mesmo eliminando a água livre, ou seja, o efeito físico do filer contribui para reduzir a zona de transição pela redução da exsudação. O efeito pode mudar o comportamento dos cristais, impedindo seu crescimento e interferindo na orientação dos cristais de hidróxido de cálcio (DAL MOLIN, 2005).

As pozolanas tem origem natural ou artificial. As naturais são de origem vulcânica ou sedimentar. As pozolanas artificiais são geradas a partir de tratamento térmico ou são subprodutos industriais, com potencial de atividade pozolânica (FREITAS 2005).

Para Poggiali (2010), com a utilização de adições minerais em concretos, tem-se inúmeros benefícios em relação ao concreto fresco e endurecido, sendo alguns fatores: a melhora da trabalhabilidade, o aumento da plasticidade sem aumentar o consumo de água, modificar o tempo de pega, reduzir a exsudação e segregação, pode-se ter o aumento da resistência final e a diminuição dos poros, melhoria da resistência à fissuração térmica em razão do baixo teor de hidratação, a resistência por ataque de sulfatos, redução da reação álcali-agregado e da corrosão das armaduras, sendo que a melhoria desses fatores reflete diretamente na durabilidade do material.

O material pozolânico tem pouco ou nenhum valor cimentício, porém, com a presença de umidade e principalmente com pozolanas finamente subdivididas, reage com o hidróxido de cálcio, liberado na hidratação do cimento, formando composto com material cimentício. Esse processo de reação química deve estar no estado amorfo da sílica, caso contrário, a sílica estará no estado cristalino, não possuindo reatividade pozolânica. (SOUSA, 2009).

A utilização de pozolanas em concretos e argamassas possui algumas vantagens técnicas, sendo reduzida ou eliminada a reação álcali-agregado, podendo haver um aumento na resistência mecânica, uma possível melhora na resistência a cloretos, sulfatos e da água do mar, assim como, pode-se ter uma redução da permeabilidade e a liberação de calor é diminuída (SOUSA, (2009).

Numa avaliação de compósitos cimentícios com pozolanas é inapropriado avaliar por um período de 28 dias, pois as atividades pozolânicas costumam ocorrer a longo prazo, sendo que avaliação de pozolanas em idades de 28 dias, acabam sendo muito limitadas (TAYLOR, 1997).

Três propriedades são fundamentais para utilização de cimentos pozolânicos, já que suas reações aumentam a velocidade de reação, consomem hidróxido de cálcio e auxiliam na distribuição dos tamanhos dos poros. Com a utilização de pozolanas, tem-se também vantagens econômicas, pois o consumo de cimento Portland será diminuído. Além disso, há uma economia de energia, visto que os materiais pozolânicos são energeticamente mais econômicos em relação ao clínquer do cimento Portland. O uso de pozolanas, contribui também para redução dos resíduos industriais poluidores, conforme (OLIVEIRA; BARBOSA, 2006).

A NBR 12653 (ABNT, 2014) determina as exigências físicas e químicas e estabelece a classe de pozolanas (tabela 3). A classe N corresponde às pozolanas naturais ou artificiais, sendo compostas por materiais vulcânicos, “*cherts*” silicosos, argilas calcinadas e terras diatomáceas. A classe C é composta por cinza volante produzida pela queima de carvão mineral em usinas termoelétricas e a classe E, que enquadra qualquer pozolana diferente das classes anteriores.

Segundo a mesma norma, o índice de perda ao fogo é menor a 10% para classe N e menor que 6% para classe C e E. O índice de atividade pozolânica com cimento, aos 28 dias, deve ser no mínimo de 90% para todas as classes e, no mínimo, de 6,0 MPa para a atividade pozolânica com cal.

Tabela 3 - Exigências físicas e químicas para material pozolânico

Propriedades	Classe de material pozolânico			Método de ensaio
	N	C	E	
Material retido na peneira 45 µm	< 20 %	< 20 %	< 20 %	ABNT NBR 15894-3(*)
Índice de desempenho com cimento Portland aos 28 dias, em relação ao controle	≥ 90 %	≥ 90 %	≥ 90 %	ABNT NBR 5752
Atividade pozolânica com cal aos sete dias	≥ 6 MPa	≥ 6 MPa	≥ 6 MPa	ABNT NBR 5751
SiO ₂ + Al ₂ O ₃	≥ 70 %	≥ 70 %	≥ 50 %	ABNT NBR NM 22 (**)
SO ₃	≤ 4 %	≤ 5 %	≤ 5 %	ABNT NBR NM 16 (**)
Teor de umidade	≤ 3 %	≤ 3 %	≤ 4 %	ABNT NBR NM 24 (**)
Perda ao fogo	≤ 10 %	≤ 6 %	≤ 6 %	ABNT NBR NM 18 (**)
Álcalis disponível em Na ₂ O	≤ 1,5 %	≤ 1,5 %	≤ 1,5 %	ABNT NBR NM 25 (**)

Fonte: Adaptado da NBR 12653 (ABNT, 2014, p. 3-4).

Nota: * Esse método de ensaio deve ser adaptado, substituindo-se o metacaulim pelo material pozolânico. Alternativamente, o método prescrito pela ABNT NBR 12826 pode ser utilizado desde que o material pozolânico retido na peneira de ensaio não apresente visualmente aglomeração de partículas.

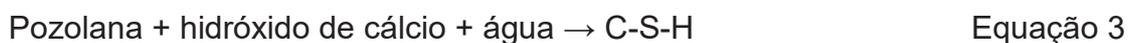
** Os métodos de ensaio devem ser adaptados, substituindo-se cimento Portland pelo material pozolânico.

Para que se desenvolva atividade pozolânica, é necessária a reação da sílica ou alumina da pozolana com o hidróxido de cálcio, em presença de água, formando silicatos de cálcio hidratados (C-S-H), (MACEDO, 2009). Para utilizar a cinza do bagaço da cana-de-açúcar como material pozolânico, a CBC deve reagir e se combinar com hidróxido de cálcio, formando os silicatos e aluminatos de cálcio hidratados, responsáveis pela resistência e durabilidade das argamassas e concretos (CORDEIRO et al., 2004).

As reações pozolânicas estão ligados aos 4 compostos principais com o cimento, que são o C₃S (silicato tricálcico), o C₂S (silicato dicálcico), C₃A (aluminato tricálcico) e C₄AF (ferroaluminato tetracálcico). Esses compostos, quando reagidos com a água, formam produtos de hidratação, sendo que após certo tempo, essa reação resulta numa massa firme e resistente. As reações de hidratação, conforme equação 1 e 2, são as seguintes (NEVILLE, 1997):



No caso de adição de uma pozolana, essa sílica amorfa na pozolana, tende a reagir com o hidróxido de cálcio, formando o composto de silicato de cálcio hidratado C-S-H, (Cordeiro, 2006) conforme equação 3:



Pesquisas com cinza do bagaço da cana-de-açúcar em compósitos cimentícios, vêm sendo feitas desde o final da década de 1990 e comprovam sua pozolanicidade (BAHURUDEEN e SANTHANAM, 2015; COCIÑA et al. 2003; CORDEIRO et al. 2008; CORDEIRO et al. 2009; FREITAS, 2005; FRÍAS et al. 2007; FRÍAS et al. 2011; GÓES, 2016; MANSANEIRA, 2010; MARTIRENA HERNANDEZ et al., 1998; PAYÁ et al., 2002; RUKZON e CHINDAPRASIRT, 2012).

Alguns estudos mostram que a utilização da CBC em substituição ao cimento Portland pode melhorar algumas características, entretanto, não é possível afirmar se essas melhorias ocorrem em função dos efeitos físicos ou químicos. Conforme Cordeiro et al. (2008), a CBC pode ter atividade pozolânica, porém, dependerá do tamanho de sua partícula e da superfície específica.

Vasconcelos (2013) constatou que para aumentar a reatividade a CBC, é necessário controlar a temperatura de queima para garantir que a sílica permaneça no estado amorfo e para que o carbono presente no material orgânico seja liberado em forma de gás. Como também relatado por Cordeiro (2006), o carbono

permanece na CBC após a queima, caracterizando uma impureza que confere à cinza um tom escuro e de reduzida reatividade. Altas temperaturas permitem que a maior parte do CO_2 seja eliminando, em contrapartida, favorecem que o SiO_2 se converta ao estado cristalino.

Dois maneiras de melhorar a reatividade da cinza são discutidas, controlar a temperatura de queima do bagaço na usina ou dar um tratamento térmico a cinza através de queima em estufa, com patamares de temperaturas. O ideal, na queima da cinza, é liberar o carbono e manter a sílica amorfa, mas o grande problema é determinar o tempo e temperatura de queima, dado que, em função de possuir vários tipos de canas, solos, diferentes climas e fertilizantes, se faz necessário muito estudo na área. Hernández et al. (1998) relatam que a reatividade da cinza diminui com a presença de carbono e demais materiais não calcinados, resultando em compostos estáveis, limitando as reações com o hidróxido de cálcio.

Embong et al. (2016) realizaram ensaios para determinar a melhor reatividade da cinza do bagaço de cana-de-açúcar. O processo foi dividido em três estágios. Avaliaram o pré-tratamento, a melhor condição de queima e comprovaram as características pozolânicas. O pré-tratamento foi feito para remover todas as impurezas e o material prejudicial da cinza, envolvendo a imersão do bagaço em diferentes concentrações de solução de ácido clorídrico em diferentes intervalos de tempo, após foi seco em uma câmara de secagem. O bagaço tratado com o melhor parâmetro passou por processo de queima com várias temperaturas (600 °C, 700 °C e 800 °C) e tempos de queima (1h, 2h e 3 h). Os autores concluíram que a queima controlada de bagaço de cana-de-açúcar a 800 °C, pelo período de 1 hora, teve o melhor desempenho devido ao conteúdo amorfo e ao alto teor de sílica, adequado para ser utilizado como material de substituição ao cimento.

Para que a cinza desenvolva atividade pozolânica, precisa estar na fase amorfa para que entre em reação com o hidróxido de cálcio do cimento. No entanto, quando o material é inerte, sem a capacidade de reação com o hidróxido do cimento, o seu benefício se deve ao preenchimento dos vazios, não tendo nenhuma relação com a atividade pozolânica e sim ao efeito fíler (ALCANTARA et al. 2012; ALMEIDA, 2013; BARROSO, 2011; CÂMARA, 2015; CORDEIRO, 2006; FREITAS, 2005; MACEDO, 2009; MANSANEIRA, 2010; SARAIVA, 2017; SOUSA, 2009; VASCONCELOS, 2013; ZARDO et al. 2004).

Há diversos exemplos de caracterização de CBC, sendo que nem sempre as cinzas apresentam boa reatividade.

Moraes (2015) utilizou a cinza da folha de cana-de-açúcar em pastas de cal/pozolanas e cimento/pozolanas e concluiu que o material possui características de material pozolânico. Os ensaios sobre argamassa comprovaram a melhora das propriedades mecânicas das matrizes cimentícias, em função da sua reatividade.

Paiva (2016) determinou a composição química da cinza e observou índice de atividade pozolânica com o cimento elevado, com valor de 90%. O índice de atividade pozolânica com a cal atingiu 6 MPa, ambos se enquadrando como material pozolânico segundo a NBR 12653 (ABNT, 2014).

Como exemplos de estudos onde a CBC não apresentou reatividade adequada, cita-se Freitas (2005), Mansaneira (2010) e Bessa (2011).

De acordo com Freitas (2005), uma das cinzas utilizadas pelo autor para estudos de resistência à compressão, calcinada a 600 °C, pelo período de 5h, apresentou atividade pozolânica inferior ao valor mínimo estabelecido por norma. O resultado ocorrido foi a queda da resistência em todas as idades ensaiadas e para todos os traços com substituição. Mansaneira (2010) utilizou duas cinzas de usinas diferentes, com três temperaturas diferentes de queima, sem o processo de moagem. O IAP das amostras não atingiu os 90% de resistência necessária, porém, realizando o processo de moagem da cinza de 600 °C, com os tempos de trituração de uma hora e duas horas, ambas atingiram o índice exigido em norma. As cinzas do bagaço da cana-de-açúcar utilizadas por Bessa (2011) apresentaram cristalinidade, por meio de ensaios de caracterização, sendo descartado o uso da cinza como pozolana, entretanto, podendo ser usado como filer, com o efeito físico no empacotamento do concreto.

Soares et al. (2016) estudaram o comportamento pozolânico da cinza do bagaço de cana-de-açúcar. Os autores concluíram que o silicato de cálcio hidratado (C-S-H) é formado em solução de cal com CBC, entretanto a reação é lenta e não consome todo o material. Por isso, os autores sugerem que a cinza seja usada como um material substituto inerte em compostos de cimento ao invés de adição pozolânica.

A pozolanicidade da CBC é resultante de fatores da geração da cinza. Muitos autores discutem sobre a reatividade da sílica com os produtos de hidratação do cimento, devido ao fato de a sílica presente na CBC estar no estado amorfo,

podendo haver reação com o hidróxido de cálcio, ou estar no estado cristalino. Como segunda opção, alguns autores, com a utilização da moagem, promovem uma maior superfície específica para cinza, contribuindo como adição mineral, devido a grãos de CBC com granulometria com diâmetro igual ou menor do que os grãos de cimento, sendo empregado como efeito físico de empacotamento granulométrico, ou seja, preenche os vazios entre os grãos do cimento, aumentando a compacidade e refinamento dos poros, promovendo o efeito fíler.

2.2 APLICAÇÕES DA CBC NA CONSTRUÇÃO CIVIL

Pesquisas referentes a destinação de resíduos gerados pela combustão do bagaço da cana-de-açúcar na construção civil são estudadas e discutidas há alguns anos. A grande maioria das pesquisas está voltada para o âmbito de substituir a cinza em concretos e argamassa (tabela 4). No entanto, uma parcela menor, vem estudando a utilização na indústria da construção civil, em tijolos de barro, fabricação de blocos de pavimentação, blocos de concreto pré-moldado.

Kazmi et al. (2016) realizaram ensaios com 5% de cinza de bagaço de cana-de-açúcar e 5% da cinza de casca de arroz para confecção de tijolos e constataram, por meio de ensaios de microscopia, uma maior porosidade com uso das cinzas.

Martins e Altoé (2015) realizam um estudo para utilização da cinza em substituição a areia a blocos de concreto para pavimentação (Pavers). Os ensaios mostraram-se viáveis, pois os blocos apresentaram uma melhora na resistência à compressão, absorção e não houve influência no desgaste à abrasão, apresentando um desgaste compatível com o referencial.

Lima et al. (2011) estudaram o uso da cinza em blocos, em dois ensaios de substituição, 6% e 12% de cimento. A resistência à compressão de 12% foi satisfatória, podendo ser utilizado na alvenaria de vedação.

Ramírez et al. (2012) estudaram a utilização da cinza do bagaço da cana-de-açúcar na produção de blocos maciços de concreto pré-moldado para fundação, sendo que adição de 10% de cinza com 10% de cal, melhora as propriedades de durabilidade dos blocos, sua compactação, flexão e compressão.

Freitas et al. (1998) estudaram a substituição do cimento Portland CP – I 32 por cinza com teor de substituição de 5%, 15% e 20% avaliando a resistência à

compressão. A resistência, na idade de 28 dias e com substituição de 15%, apresentou um ganho de 22%.

Caldas et al. (2000) realizaram estudos com a possibilidade de utilização da cinza do bagaço da cana-de-açúcar como material pozolânico substituição por parte do cimento Portland. Concluíram que a utilização da cinza como adição de cimento mostrou viabilidade em função da atividade pozolânica. As cinzas utilizadas pelos autores mostraram a presença de sílica amorfa.

Freitas (2005) avaliou cinzas de duas usinas, uma delas na fase cristalina, que não apresentou resultados satisfatórios; e as da segunda usina, com tratamento de queima. Os ensaios com substituição da CBC em argamassas, para avaliação da resistência à compressão apresentaram resultados inferiores para todos os teores, porém, as amostras feitas com cinzas calcinadas a 600 °C, por um período de 5 horas e moídas por uma hora, com teor de 10% de substituição, apresentaram resistências próximas da referência.

Como o presente trabalho busca avaliar a durabilidade de materiais cimentícios, realizou-se um levantamento bibliográfico para verificar o tipo de cimento utilizado, a faixa de substituição e o teor máximo recomendado pelos autores (conforme tabela 4).

Tabela 4 - Teores de substituição, material substituído, tipo de cimento utilizado

(continua)

Autor	Ano	Compósito cimentício	Teor de substituição	Material substituído	Tipo de cimento	Teor ideal substituição
Macedo	2009	Argamassa	3%, 5%, 8%, 10%	Areia	CP - V-ARI-Plus	Até 5%
Almeida	2013	Argamassa e Concreto	30 e 50%	Areia	CP – II - E-32	Até 30%
Bessa	2011	Argamassa Concreto	10, 20, 30, 50 e 100% 30, 50%	Areia	CP – II – E-32	Até 30%
Freitas et al.	1998	Argamassa	5%, 10%, 15% e 20%	Cimento	CP - I	Até 15%
Chusilp et al.	2009	Argamassa	10%, 20%, 30% e 40%	Cimento	CP - I	Até 20%
Poggiali	2010	Argamassa	10, 15, 20, 30%	Cimento	CP - I	Até 15%
Mansaneira	2010	Argamassa	10%, 20% e 30%	Cimento	CP - V - ARI	Até 20%
Paula	2006	Argamassa	10%, 20%, 30%	Cimento	CP - V - ARI-Plus	Até 20%
Pereira	2014	Argamassa e pasta	10, 15%, 20% e 30%	Cimento	CP – V-ARI Plus Holcim	Até 20%
Sousa	2009	Argamassa	5%, 10% e 20%	Cimento	CP - V – ARI	Até 20%
Moraes	2015	Argamassa e Pastas	15, 20, 25, 30%	Cimento	CP - V – ARI Plus.	Até 30%
Saraiva	2017	Argamassa	10, 20 30%	Cimento	CP - V - ARI	Até 30%
Câmara	2015	Argamassa e Concreto	5, 10 e 20%,	Areia	CP - V - ARI	*
Freitas	2005	Argamassa	5, 10, 15 e 20%	Cimento	CP – II - E-32	*

Autor	Ano	Compósito cimentício	Teor de substituição	Material substituído	Tipo de cimento	Teor ideal substituição
Paiva	2016	Concreto convencional e alta resistência	10 e 15%	Cimento	Poços Petrolíferos (CPP) classe G	Até 10%
Silveira	2010	Concreto convencional e alta resistência	5%, 10% e 20%	Cimento	CP - V-ARI	Até 10%
Cordeiro	2006	Concreto convencional, alta resistência e Pasta	10%, 15%, 20% e 40%,	Cimento	Poços Petrolíferos (CPP) classe G	Até 20%
Santos	2017	Pastas	20% e 35%	Cimento	CP - II F32	Até 20%
Souto	2010	Concreto	5, 10, 15, 20, 25, 30%	Areia	CP - V-ARI	Até 20%
Agassi	2011	Concreto	5, 10, 15, 20, 25, 30 ,40 e 50%,	Areia	CP - V-ARI	Até 20%
Ganesan	2007	Concreto	5%, 10%, 15%, 20%, 25% e 30%	Cimento	Cimento Portland comum	Até 20%
Sampaio	2013	Concreto	10, 20 30%	Cimento	CP - II Z 32	**
Santos	2013	Concreto	12%	Cimento	CP - V-ARI	*

Fonte: Elaborada pelo autor.

Nota: * Não informado.

Analisando a tabela 4 pode-se observar que o teor de substituição, para os ensaios de substituição são entre 5% e 40%, sendo que a substituição de cimento Portland por CBC de até 30% não resulta em perda considerável de resistência mecânica. Vale ressaltar que para os ensaios com substituição de agregado miúdo pela areia houve porcentuais de até 50% de substituição, porém, constatou-se que não há perdas de resistência mecânica até 30% de substituição.

2.2.1 Efeitos do Uso de CBC no Estado Fresco

Paiva (2016) conclui que, com o emprego da cinza, utilizou-se uma quantidade menor de aditivo superplastificante por metro cúbico, devido ao fato de a cinza promover uma melhoria na trabalhabilidade em todas as classes de concreto estudadas, dentro da faixa de abatimento estipulada.

Para Cordeiro (2006) os ensaios com utilização da cinza com diversas configurações de moagem, tiveram propriedades melhoradas no estado fresco, como o aumento do abatimento do tronco de cone e redução da tensão de cisalhamento de escoamento em relação ao referencial. O autor conclui ainda, que a utilização da cinza não provoca alterações expressivas na reologia dos concretos, sendo reduzido o consumo de cimento Portland, colaborando para diminuir o calor de hidratação.

Silveira (2010) atribuiu mudanças no estado fresco, reduzindo a quantidade de água, influenciando diretamente na trabalhabilidade e no teor de ar incorporado. Levantou indícios de redução do abatimento devido a CBC residual, superfície específica alta, e ao alto teor de carbono.

Para diversos autores, para manter a trabalhabilidade de concretos e argamassas com CBC em relação ao referencial, foi necessária, uma quantidade maior de água, aumentando assim a relação água/cimento, para a consistência desejada (ALCÂNTARA E SANTOS, 2011; ALMEIDA, 2013; ANJOS et al. 2010; GANESAN et al. 2007; SARAIVA, 2017; SINGH et al. 2000; SOUTO, 2010).

Anjos et al. (2010) constatam que utilizando cinza no concreto fresco, houve aumento da quantidade de água e uma melhor coesão dos concretos. No estado endurecido, a resistência apresentou pequena diminuição, sendo que os autores atrelaram esse fato ao aumento da quantidade de água de amassamento.

Souto (2010) verificou alterações no concreto fresco ao utilizar quantidades maiores de CBC residual, resultando num volume maior de água e maior relação água/cimento. Todavia, observou-se que, com a utilização de cinza com granulometria com diâmetros reduzidos, houve elevação na coesão do concreto. Todos os traços tiveram influência com uso do CBC, sendo que o traço com 30% de substituição, teve um consumo 15,1% maior de água se comparado ao referencial, para se ter o mesmo abatimento.

Alcântara e Santos (2011) estudaram a utilização da CBC em concreto auto-adensável, sendo que as cinzas utilizadas eram do tipo cristalinas. Além de maiores teores de água na composição, devido a granulometria muito fina, os autores observaram que o efeito da segregação foi diminuído com o uso da cinza.

Bessa (2011) realizou estudos com várias porcentagens de substituição, sendo que a trabalhabilidade permaneceu a mesma, com exceção da amostra com substituição de 100%. O autor justifica a perda de trabalhabilidade por ter necessitado uma quantidade maior de água para se ter a mesma consistência do estado fresco, sendo sugerido pelo autor que, para o caso de substituição de 100%, houvesse o uso de aditivo superplastificante.

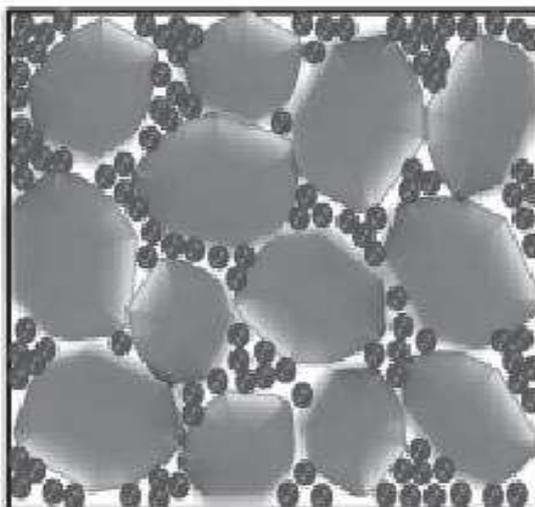
Câmara (2015) realizou ensaios sobre a velocidade dos pulsos ultrassônicos, sendo realizados por leituras de resistência à penetração nas argamassas. Observou que as argamassas com cinzas aceleram a pega, em comparação com as amostras referência. O autor constata que a utilização da cinza proporciona uma aceleração no processo de hidratação, devido à reatividade da cinza do bagaço da cana-de-açúcar.

A discussão sobre o uso da cinza de bagaço de cana-de-açúcar na influência nos compósitos cimentícios no estado fresco possui opiniões e conclusões esparsas. Para alguns autores, o uso da CBC não altera as propriedades do estado fresco em relação à trabalhabilidade; outro autor que defende a ideia de redução da quantidade de água com uso da CBC, todavia, a maioria dos autores relata ter um aumento da quantidade de água com uso da CBC, devido à granulometria dos grãos da cinza ser inferior aos grãos do cimento.

2.2.2 Efeitos do Uso de CBC no Estado Endurecido

As adições minerais de cinzas, como as da casca de arroz e do bagaço da cana-de-açúcar, através de substituição por parte de cimento, alteram as propriedades dos compósitos cimentícios no estado endurecido por meio da sua pozolanicidade ou pelo efeito físico, como visto no capítulo 2.1.3. A primeira está relacionada com a quantidade de material silicosos e/ou aluminiosos no seu estado amorfo, para que ocorram reações com o hidróxido de cálcio. Já para o segundo caso, as propriedades são alteradas através da influência do empacotamento na mistura, em razão que a cinza preenche as partículas de cimento por serem mais finas, aumentando a capacidade da mistura, conforme visualizado na figura 5. Os grãos maiores são as partículas de cimento e os menores são as partículas de pozolana (SOUZA, 2011).

Figura 5 - Esquema do efeito fíler



Fonte: Souza (2011, p. 19).

O parâmetro de avaliação de idades para resistência à compressão é de 28 dias de cura, porém, algumas estruturas de concreto podem sofrer carregamentos após essa idade, por isso, Paiva (2016) recomenda a utilização de materiais alternativos, com reatividade lenta, que seria o caso da cinza do bagaço de cana-de-açúcar. Com isso, tem-se uma alternativa mais econômica pra estruturas que podem sofrer um carregamento nas idades avançadas.

Chusilp et al. (2009) realizaram um estudo sobre a influência da quantidade de materiais carbonáticos na resistência à compressão e aos sulfatos em argamassas. Os autores produziram argamassas de cimento Portland com cinzas com vários teores de perdas ao fogo de (5%, 10%, 15% e 20%). Cada teor de cinza, foi empregada em substituição à massa de cimento, nos teores de 0%, 10%, 20%, 30% e 40%. Os resultados de resistências à compressão para as substituições de 20% de CBC por cimento Portland com teor de até 20% de perda ao fogo, tiveram resistências superiores à argamassa de referência.

Mansaneira (2010) realizou ensaios de resistência à compressão em argamassas, com 3 teores de substituição, 10%, 20% e 30% de cimento Portland por cinza. O autor concluiu que com a substituição de até 20% para o tempo de uma hora de moagem e com a substituição de até 10% para o tempo de duas horas de moagem, ambas queimadas a 600 °C, houve aumento da resistência mecânica em relação ao referencial. O autor constata, através de seus resultados, o possível uso da cinza do bagaço da cana-de-açúcar em substituição parcial ao cimento Portland na produção de argamassas.

Paiva (2016) relata que existe uma incerteza na literatura, se o aumento de resistência mecânica, devido a melhoria das propriedades físicas com uso da CBC foi pelo efeito pozolânico ou pelo efeito fíler.

Chi (2012) realizou ensaios com argamassas com substituição de cimento por cinza do bagaço da cana-de-açúcar com substituição de 10%, 20% e 30% com relação a/c de 0,55. A propriedade avaliada foi a resistência à compressão, que obteve um desempenho superior com as amostras de 10% de substituição em comparação ao referencial.

A pesquisa de Ganesan et al. (2007) com substituição de cimento Portland por CBC, mostrou que, com a substituição de até 20%, houve uma melhora na resistência inicial, redução da permeabilidade e considerável resistência à cloretos, fato que proporcionou uma melhora significativa quanto às propriedades do concreto com a utilização da cinza do bagaço da cana-de-açúcar.

Várias pesquisas com objetivos de avaliar a substituição de cimento Portland ou agregado miúdo por cinza do bagaço de cana-de-açúcar em concretos ou argamassas vêm sendo realizadas desde o final da década de 1990. Conforme apontam os dados apresentados na tabela 4, os teores de substituição indicados por diferentes pesquisadores são da ordem de até 30%.

2.3 DURABILIDADE DE COMPÓSITOS CIMENTÍCIOS COM CBC

A grande maioria dos autores que trabalha com a utilização da cinza do bagaço da cana-de-açúcar em compósitos cimentícios, avalia as características físicas e químicas, pozolanicidade, alteração da reologia dos compósitos no estado fresco e as propriedades mecânicas desses compósitos no estado endurecido. Alguns estudos relativos à durabilidade foram feitos em relação à penetração de cloretos e ataque a sulfatos (CHUSILP et al. 2009; CORDEIRO, 2006; GANESAN et al. 2007; JOSHAGHANI et al. 2017; RERKPIBOON et al. 2015; SOMNA et al. 2012).

A utilização de adições minerais em compósitos cimentícios podem alterar as propriedades no estado fresco e/ou endurecido. No primeiro, tem-se uma melhora na plasticidade e na trabalhabilidade; já no segundo, menor calor de hidratação diminuindo a fissuração por retração térmica, minimizando a corrosão das armaduras e aumentando a resistência final, o que melhora a durabilidade do concreto ou da argamassa (SOARES, 2010).

A durabilidade dos concretos está diretamente ligada às características da matriz cimentícia que atua como ligante dos agregados. Esta matriz, ao incorporar uma pozolana, fíler ou material com propriedades cimentícias, altera a velocidade das reações químicas do processo de hidratação e, conseqüentemente, a evolução da microestrutura. Essas alterações afetam diretamente as propriedades de durabilidade do concreto, quando expostos e submetidos aos agentes agressivos (HOPPE, 2008).

Os concretos com CBC analisados por Paiva (2016), mostraram que a profundidade carbonatada foi maior se comparada ao convencional, porém, a resistência à compressão não teve variação nos ensaios com substituição de 10% de CBC. O autor conclui que a utilização resulta em melhoras na durabilidade dos concretos com cinza, todavia, há poucos estudos relacionados à durabilidade de concretos com substituição de cimento Portland por cinza de bagaço de cana-de-açúcar, principalmente relacionados à carbonatação.

Em estruturas o processo de carbonatação e penetração de íons cloreto são os dois principais fatores de degradação. A utilização de aditivos minerais, geralmente, corrobora para uma frente de carbonatação maior, em função das alterações das propriedades químicas do processo de hidratação. Entretanto, o uso de pozolanas em quantidades adequadas resulta em uma matriz menos permeável

à entrada de agentes agressivos, melhorando a durabilidade. Nesse trabalho é avaliada a durabilidade de compostos cimentícios com CBC, a partir da carbonatação acelerada. Devido a isso, prioriza-se na revisão, o processo de carbonatação.

2.3.1 Processo de Carbonatação

O fenômeno da carbonatação é uma ação natural de gases ácidos presente no ambiente, sendo que em contato com o concreto, tem a facilidade de penetrar nos poros e fissuras; com a presença de vapor de água, reagem com os produtos de hidratação do cimento, formando o carbonato de cálcio, reduzindo o pH. Alguns dos principais gases ácidos encontrados no meio ambiente que participam desse processo são o gás sulfídrico (H_2S), o dióxido de enxofre (SO_2) e, o gás carbônico (CO_2) (WERLE, 2010).

Esse fenômeno é um dos principais processos de deterioração de estruturas de concreto armado, mesmo ocorrendo de forma lenta, devido a baixas concentrações de CO_2 , que geralmente variam no meio ambiente, em torno de 0,03 a 0,06% em volume de CO_2 (BERTOS et al. 2004; GRUYAERT et al. 2013; HOUST e WITTMANN, 2002; HYVERT et al. 2010; SISOMPHON e FRANKE, 2007).

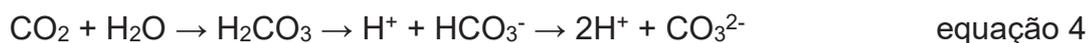
A carbonatação consiste na redução da alcalinidade do pH do concreto, sendo que essa região de proteção da armadura encontra-se passivada. Com a perda da alcalinidade, a frente de carbonatação atinge a armadura, levando a despassivação do aço, deixando vulnerável a propagação da corrosão (ALMEIDA, 2013).

A resistência mecânica do concreto é um dos fatores importantes desse composto, pois o concreto armado deve atender às necessidades mecânicas solicitadas, assim como, proteger o aço que se encontra em idades iniciais passivado Werle (2010). Sendo assim, o concreto protege a armadura, por meio da camada de passivação sendo que, com as reações de carbonatação, o pH diminui, a camada desestabiliza em função dessa diminuição e a armadura fica exposta para o início do processo de corrosão.

O processo de carbonatação ocorre em diversas etapas. Na fase aquosa dos poros ou fissura, há uma difusão do CO_2 com uma saturação parcial. A etapa de reação do CO_2 com os álcalis na solução dos poros e a etapa de reação do

hidróxido de cálcio com os produtos de hidratação do cimento, dos silicatos e aluminatos hidratados, (PAPADAKIS, 1992; TAYLOR, 1997). A sequência das reações de acordo com Papadakis et al. (1991).

- a) Processo de difusão de CO_2 da fase gasosa dos poros e fissuração e posterior dissolução de água dos poros formando ácido carbônico, onde o mesmo se dissocia forma o íon bicarbonato e logo após o íon carbonato, conforme equação:



- b) Carbonatação dos álcalis, o CO_2 se dissocia na solução do poro, e reage com os álcalis (conforme equações 4 e 5):



Esses produtos são altamente solúveis e se dissociam do íon carbonato para reações seguintes (conforme equação 7):



C) Dissolução do $\text{Ca}(\text{OH})_2$ e a posterior formação do carbonato de cálcio. O hidróxido de cálcio necessita da concentração de OH^- , onde o álcalis, uma quantidade pequena de $\text{Ca}(\text{OH})_2$ encontra-se dissolvida no poro. Com o consumo dos álcalis, o hidróxido de cálcio tem a solubilidade aumentada e se dissocia (conforme equação 8):

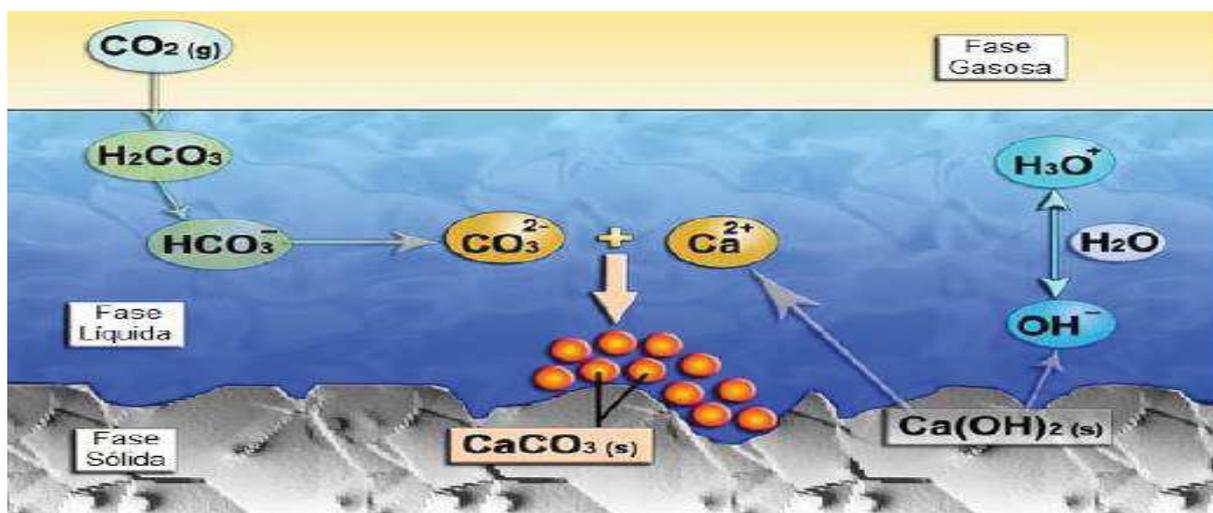


A reação do hidróxido de cálcio dissolvido com os íons carbonato, precipitando-se o carbonato de cálcio (equação 9):



Por meio da figura 6, é possível verificar as três fases do processo de carbonatação do hidróxido de cálcio apresentadas por Thiery (2005 apud PAULETTI, 2009):

Figura 6 - Três fases de carbonatação do hidróxido de cálcio



Fonte: Thiery (2005 apud PAULETTI, 2009, p. 36).

O processo de carbonatação pode ser compreendido como “frente de carbonatação” que é dividido por duas faixas de pH diferentes, sendo o concreto endurecido nas idades iniciais, cujo pH está acima de 12, não carbonatada, e abaixo de 9, onde o concreto já está carbonatado. (HOPPE, 2005).

Paiva (2016) define como fator essencial para que ocorra a frente de carbonatação, a presença de umidade, sendo que a mesma não deve ser elevada demais, pois dificulta a difusão do CO_2 nos poros e nas fissuras e nem baixa demais para que aconteçam as reações de dissolubilização do hidróxido de cálcio no poro.

Há uma variação de valores entre pesquisadores no que tange a umidade ideal para ocorrer a máxima reação da carbonatação. Conforme Masazza (1998) a carbonatação atinge valores de umidade ideal entre 50% e 70%, no entanto, encontra-se na literatura trabalhos com variação de umidades de 40% à 80%.

Como a carbonatação natural é muito lenta, devido ao baixo teor de CO_2 no meio ambiente, diversos estudos trabalham com ensaios de carbonatação acelerados, sendo que utilizam concentrações de CO_2 variadas (GRUYAERT et al. 2013; KULAKOWSKI et al. 2009; LI et al. 2007; SILVA, 2017; SIM E PARK, 2011; THOMAS et al. 2013; YOUNSI et al. 2013).

Existem algumas técnicas simples e muito utilizadas na literatura para medição da carbonatação, são os chamados métodos calorimétricos, que são realizados através da aspensão em medir a alteração de cor como indicador de pH. O mais usual é a solução a base de fenolftaleína. Segundo Paiva (2016), o indicador

proporciona três pontos de viragem quando aspergido em materiais cimentícios: uma zona incolor, que indica pH abaixo de 8; uma zona rosa de pH entre 8 e 10 e uma roxa ou carmim, que representa um pH entre 10 e 12.

Houst e Wittmann (2002) realizaram ensaios de carbonatação e concluíram que a frente de carbonatação é maior em relações a/c maiores, justificando que sua rede de poros permite que o CO₂ se difunda profundamente na estrutura, carbonatando mais facilmente.

Concretos com pozolanas tendem a ter uma profundidade maior de carbonatação quando comparados aos convencionais. Sendo que a frente de carbonatação é ainda maior nas primeiras idades, podendo estar vinculado as reações lentas das pozolana (FIDJESTOL; LEWIS 1998; KULAKOWSKI et al. 2009; MASSAZZA 1998; PAPADAKIS 2000; SISOMPHON; FRANKE 2007).

Sisomphon e Franque (2007) ressaltam que compósitos cimentícios com substituição de cimento por uma parte de pozolana são menos resistentes à frente de carbonatação, devido ao baixo teor de Portlandita, em função da substituição e também pelo consumo durante as reações pozolânicas.

2.3.2 Carbonatação em Compósitos Cimentícios com CBC

Pesquisas com ênfase na análise de atividade pozolânica das CBC, indicam métodos para identificar e estimar a quantidade de hidróxido de cálcio consumido e do carbonato de cálcio através de termogravimetria e difratometria de raios X em diferentes idades de hidratação, assim como a formação das estruturas dos poros, pois a aspensão de indicador alcalino não indica a presença ou ausência de hidróxido de cálcio (MARTIRENA HERNANDEZ et al. 1998; 2000; 2001; PAIVA 2016).

Silveira (2010) realizou ensaios com duas relações a/agl 0,37 e 0,6 e em comparação a carbonatação natural e acelerada com 100% de CO₂. Realizando ensaios com substituição de cimento Portland por CBC de 5%, 10% e 20%. A frente de carbonatação foi medida para a idade de 290 dias com carbonatação natural, ambiente de laboratório, e para carbonatação acelerada, em câmara de carbonatação com 100% CO₂. Comparando-se as duas relações a/agl, a frente de carbonatação maior foi para a relação mais alta, na ordem de 10 vezes comparado a relação a/agl 0,37, fato esse apresentado pelo autor, influenciado pela quantidade

de cimento Portland no concreto. Para ambos os casos com carbonatação natural e acelerada, tem-se uma maior velocidade de carbonatação com substituição do cimento Portland pela cinza residual.

Agassi (2011) realizou ensaios com substituição de 5%, 10%, 15%, 20%, 25%, 30%, 40% e 50%, sendo que houve um aumento na resistência à compressão até a substituição de 20%. Para os ensaios de carbonatação, os mesmos foram até os 14 dias, com uma quantidade de 5% de CO₂, e, após essa data, diminuiu-se para 1% de CO₂, nas idades de 14, 28 e 56 dias. Os corpos de provas com CBC, apresentaram dificuldade de avanço da frente de carbonatação. Sendo que os melhores resultados foram obtidos entre os traços com 15 e 20% de CBC. A partir disso, até os 50%, os resultados foram menores. Alguns resultados da frente de carbonatação, como a profundidade de carbonatação mostraram-se inferiores em idades avançadas com o mesmo percentual de substituição.

Lima et al. (2011) realizou ensaios de substituição de areia por ACBC, em corpos de provas cilíndricos com dois tipos de cimentos, sendo traço referência com CP V ARI RS e CP II E 32, com 30% e 50% de ACBC com cimento CP II E 32, e uma amostra com substituição de ACBC com 50% com CPV ARI RS. Após os 28 dias de cura, as amostras foram condicionadas em estufa a 60% UR até a data de ensaio de carbonatação natural, nas idades de 60, 120 e 210 dias, resultando uma frente maior de carbonatação para os traços com CBC.

Os autores tiveram para todas as amostras com ACBC valores de profundidade de carbonatação maiores do que os das referências, sendo que as amostras referência com cimento CP II E 32 e com 30% de substituição utilizando o mesmo cimento, tiveram valores muito próximos na idade de 210 dias. A variação (o coeficiente de variação) dos resultados encontrados, ficou entre 15% e 20%.

Almeida (2013) realizou ensaios acelerados de carbonatação em traços com substituição da areia da cinza do bagaço da cana-de-açúcar em corpos de prova cilíndricos de argamassa. A opção de realizar sem o agregado graúdo, foi definida para minimizar a sua influência na frente de carbonatação, pois o mesmo pode atuar como barreira, conforme Pauletti et al. (2007) e Kulakowski (2002). O teor utilizado na câmara foi de 15% de CO₂, UR de 50% à 85%, sendo que após os 28 dias de cura, os modelos foram pré-condicionadas (sazonamento) por 5 dias, sendo que, após a distribuição de umidade, foram condicionadas na câmara de carbonatação acelerada, até as suas datas de ensaios em 7, 14, 56, 84 dias, com traço referência

de 30% e 50% de substituição e areia por areia da cinza do bagaço da cana-de-açúcar.

Almeida (2013) concluiu por meio de suas análises, a profundidade carbonatada para amostras de referência e com a substituição com ACBC, não sendo possível constatar com exatidão se a substituição do ACBC provoca influência na profundidade de carbonatação, visto que os resultados para as três amostras foram muito semelhantes.

Paiva (2016) confeccionou corpos de prova cilíndricos, de 75 mm diâmetro e 150 mm de altura, pois atende ao requisito mínimo da norma Americana para teste de resistência química, ASTM C 267 (2001). A classe dos concretos (C25 e C60) com substituição de CBC nas proporções de 0%, 10% e 15%. Os corpos de prova foram submetidos à carbonatação acelerada, após os 28 dias de cura e 25 dias de distribuição de umidade, com concentração de 4% de CO₂ em volume, e umidade de 50%, realizando a exposição nas idades de 0, 7, 28, 56 e 112 dias, com uso de fenolftaleína.

Para os resultados de carbonatação no concreto de classe de resistência C25 com 10% e 15% de substituição da cinza, as amostras foram totalmente carbonatadas na idade de 112 dias. O autor concluiu, para esse fato, que quanto maior o teor de substituição de cimento por CBC, menor a quantidade de cimento, o que resulta numa quantidade menor de hidróxido de cálcio para reação. Através das análises termogravimétricas, foi observado que a cinza consumiu hidróxido de cálcio, reduzindo a alcalinidade do concreto, com uma reatividade lenta, o que propiciou uma carbonatação mais rápida.

Ainda para o mesmo autor e para a classe de resistência de C25, o concreto com substituição de 10% apresentou um aumento de resistência após 7 dias de exposição. Paiva (2016) conclui que possa haver ocorrido, durante o período de carbonatação, um preenchimento dos poros pelos cristais de carbonato de cálcio e descalcificação dos silicatos de cálcio hidratados, indicados pelas análises termogravimétricas. Já a descalcificação do silicato de cálcio hidratado, ocorreu mais rápido com as pozolanas devido a menor quantidade de hidróxido de cálcio, com o processo da carbonatação, o ácido carbônico presente nos poros, pode ter degradado o C-S-H.

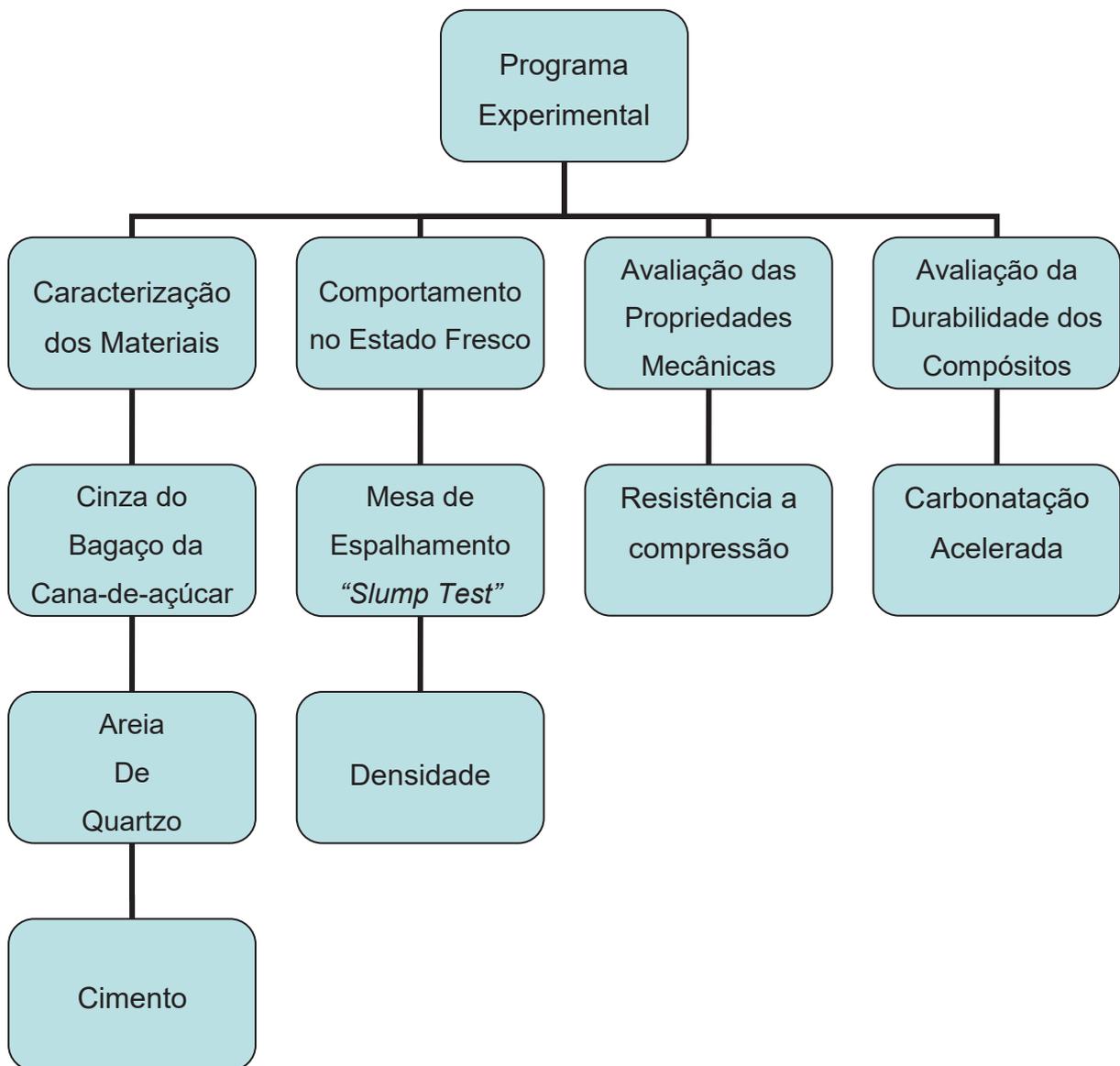
Paiva (2016) ressalta que para ambas as classes de resistência, C25 e C60, quanto maior o teor de substituição do cimento Portland por CBC, maior a redução

da resistência à compressão, sendo que a redução da resistência está associada à degradação maior do C-S-H nas regiões carbonatadas.

3 MATERIAIS E MÉTODOS

Nesse capítulo são apresentados os materiais, métodos e a caracterização dos materiais que foram utilizados no programa experimental, para a realização dos objetivos propostos para essa pesquisa, assim como o detalhamento sobre a produção e moldagem dos corpos de prova, que foram submetidos a ensaios mecânicos e de durabilidade. A Figura 7 ilustra o fluxograma para realização dos ensaios para caracterização do material e obtenção dos resultados de durabilidade avaliados.

Figura 7 - Fluxograma do programa experimental



Fonte: Elaborada pelo autor.

O planejamento da pesquisa se constitui por variáveis no programa experimental, possuindo fatores de controle, fixos, não controlados e as variáveis de resposta do programa (conforme quadro 2):

Quadro 2 - Variáveis do programa experimental

Controle	Cinza	1 tempo de moagem – 2H	
	Relação a/agl	0,4 ; 0,5 ; 0,6	
	Teor de cinza	0%; 5%; 10%; 20%; 30%	
Fixo	Tipo de cimento	CP V - ARI	
	CBC Mesmo lote	Usina	
	Teor CO ₂	1 %	
	Temperatura	Cura 21 °C ± 2 °C	Sazonamento 23°C±2°C
	Umidade	Cura 95% à 100%	Sazonamento 60%
Variáveis de resposta	Resistência Compressão	7; 28; 63 dias	
	Ensaio de Carbonatação	28, 63, 121 e 149 dias	

Fonte: Elaborado pelo autor.

A única etapa no programa experimental cuja temperatura e umidade não foram controlados, foram nas moldagens dos corpos de prova. No entanto, logo após a finalização da moldagem, os corpos de provas foram levados a sala de cura.

3.1 CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS

A caracterização do material utilizado na fase experimental dessa pesquisa, foi obtido por meio de procedimentos normativos.

3.1.1 Cimento

O cimento utilizado para o programa experimental foi o CP V – ARI, pois não contém adições – podendo ter até 5% em massa de material carbonático. Sendo o cimento um fator fixo, pode-se analisar melhor os efeitos da substituição da CBC em misturas cimentícias.

As análises físicas e químicas do cimento foram fornecidas pelo fabricante, conforme tabela 5 e tabela 6, respectivamente:

Tabela 5 - Caracterização física do cimento CP V -ARI

Ensaio	Norma utilizada	Resultados (média)	Exigência
Blaine (cm ² /g)	NBR NM 76	4.671	-
Retido na # 200 (%)	NBR 11579	0,3	<=6,0
Retido na # 325 (%)	NBR 9202	1,5	-
Tempo de início de pega (m)	NBR NM 65	239	>=60
Tempo de fim de pega (m)	NBR NM 65	304	<=600
Resistência à compressão 01 dias (MPa)	NBR 7215	22,5	>=14
Resistência à compressão 03 dias (MPa)	NBR 7215	37,3	>=24
Resistência à compressão 07 dias (MPa)	NBR 7215	42,4	>=34
Resistência à compressão 28 dias (MPa)	NBR 5733	48,2	-

Fonte: Elaborada pelo autor.

Tabela 6 - Caracterização química do cimento CP V -ARI

Ensaio	Norma utilizada	Resultados (média)	Exigência
MgO (%)	NBR 14656	3,5	<=6,50
SO ₃ (%)	NBR 14656	3,1	<=4,5
PF (%)	NBR NM 18	3,9	<=6,50
Resíduo insolúvel	NBR NM 15	-	-

Fonte: Elaborada pelo autor.

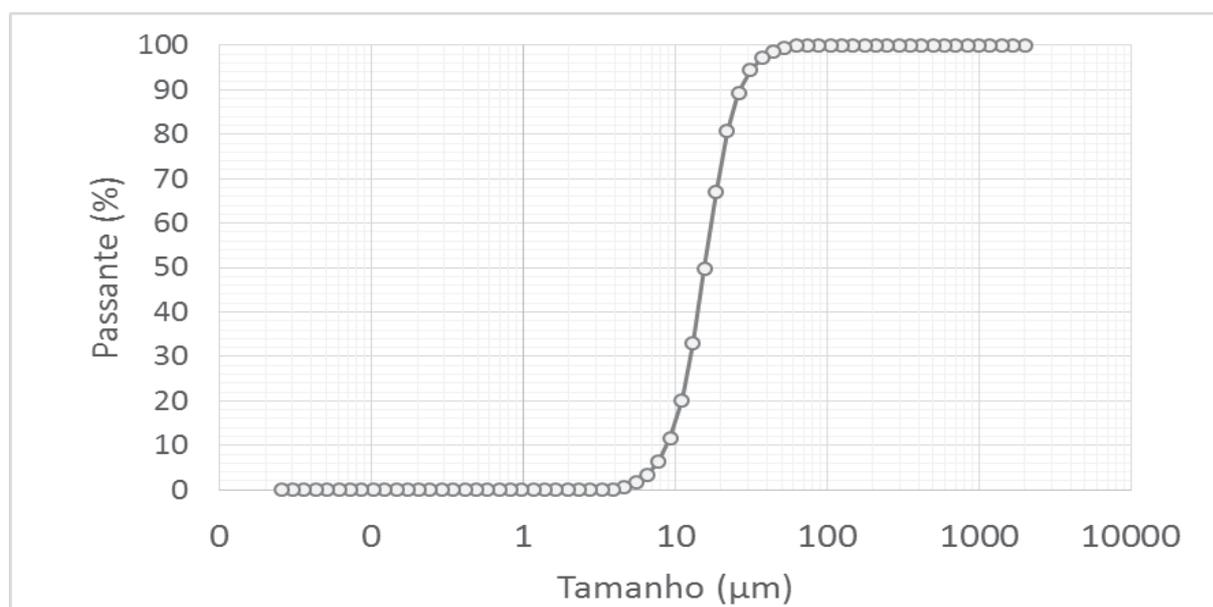
Foi realizada a densidade do cimento no laboratório de caracterização e valorização (LCV mat) da Unisinos. O gás hélio foi utilizado como gás inerte, sendo encontrada a média de densidade $3,07 \text{ g/cm}^3$ e desvio padrão de 0,002. A caracterização física em relação a distribuição granulométrica pode ser verificada na tabela 7 (anexo C), ressaltando dimensão média (D50) das partículas em μm e a distribuição granulométrica no gráfico 1 (Apêndice A).

Tabela 7 - Dimensão das partículas do cimento.

D (%)	Tamanho (μm)
10	8,85
20	10,98
30	12,62
40	14,09
50	15,57
60	17,19
70	19,14
80	21,80
90	26,62
95	32,10

Fonte: Elaborada pelo autor.

Gráfico 1 - Distribuição granulométrica do cimento



Fonte: Elaborado pelo autor.

3.1.2 Agregado Miúdo

O agregado miúdo utilizado é de origem natural quartzosa, proveniente no estado do Rio Grande do Sul. As caracterizações de massa específica e determinação de curva granulométrica, foram realizadas de acordo com a NBR NM 52 (ABNT, 2009) e NBR NM 248 (ABNT, 2003).

Foi determinada a massa específica da areia no laboratório de caracterização e valorização (LCV mat) da Unisinos, sendo encontrado a média de massa específica de 2,61 g/cm³ e desvio padrão de 0,002.

Foi realizado ensaio para determinação do teor de matéria orgânica, segundo a NBR NM 49 (ABNT, 2011), que comprovou a inexistência desse contaminante.

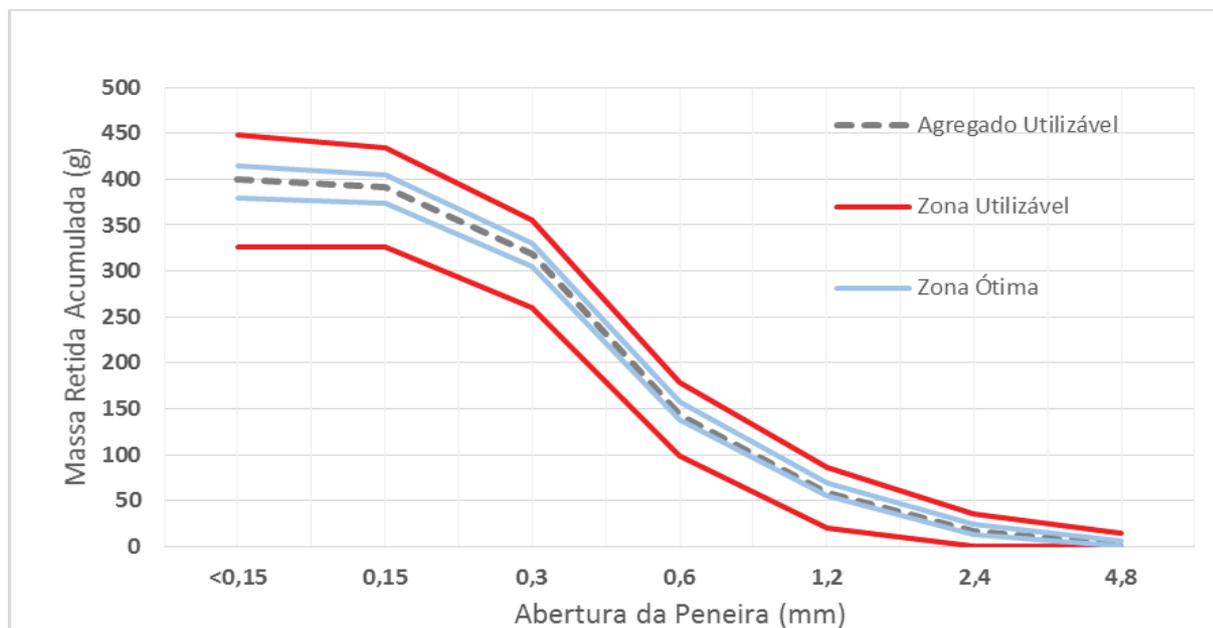
Foi realizada a secagem da areia em estufa com temperatura de 100 °C, num período de 48 horas e, posteriormente, o material foi acondicionado em toneis plásticos com tampa. A composição granulométrica da areia pode ser analisa na tabela 8 (Apêndice B), assim como, a linha pontilhada se refere a curva da areia no gráfico 2 (Anexo B).

Tabela 8 - Caracterização granulométrica da areia

Abertura da Peneira (mm)	Massa retida (%)	Massa retida acumulada (%)
4,8	1	1
2,4	3	4
1,2	11	15
0,6	21	36
0,3	44	80
0,15	18	98
<0,15	2	100
Dimensão máxima característica		2,4
Módulo de finura		2,3

Fonte: Elaborada pelo autor.

Gráfico 2 - Distribuição granulométrica da areia

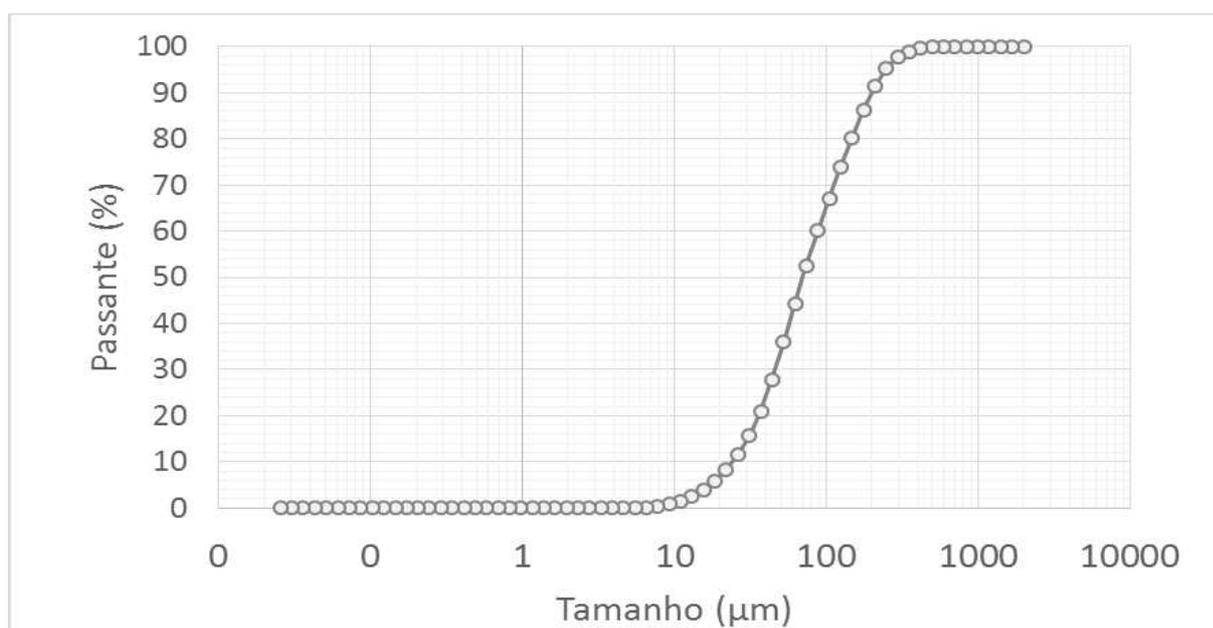


Fonte: Elaborado pelo autor.

Nota: Areia utilizada é oriunda de empresa que realiza a composição da areia na zona ótima.

Foi realizada a granulometria a laser no laboratório de caracterização e valorização (LCV mat) da Unisinos, para caracterização do material passante da #200 (correspondente a 2% do total), conforme gráfico 3 (Apêndice A).

Gráfico 3 - Distribuição granulométrica da areia dos grãos passantes na #200



Fonte: Elaborado pelo autor.

3.1.3 Água

A água utilizada é proveniente da rede de abastecimento de água local, da cidade de São Leopoldo.

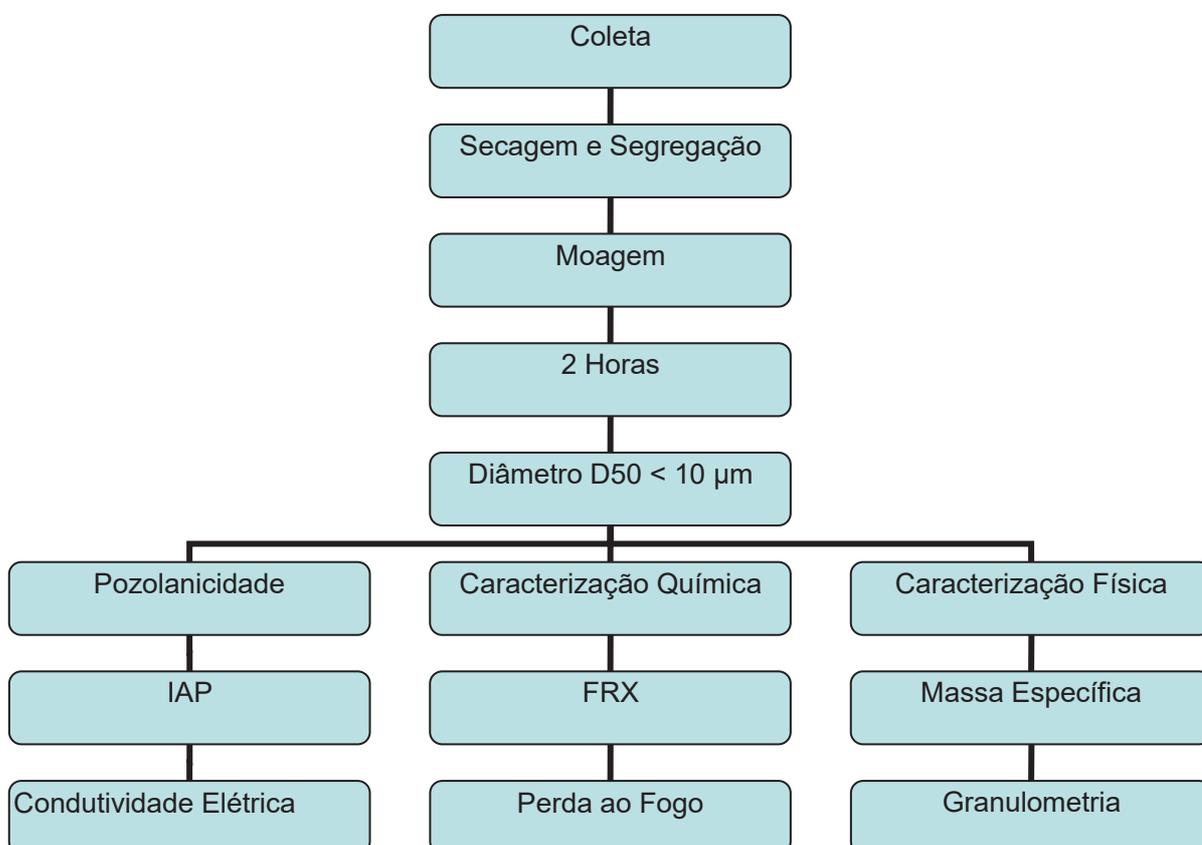
3.1.4 Aditivo Super Plastificante

O aditivo utilizado na presente pesquisa é o GLENIUM 51, de terceira geração. Foi realizado um ensaio piloto, com a porcentagem de aditivo que seria necessária para se ter a mesma faixa de consistência para os 15 traços trabalhados na pesquisa.

3.1.5 Cinza do Bagaço da Cana-de-Açúcar

A seguir, será apresentado o fluxograma (figura 7), das etapas realizadas para a caracterização da CBC, e dos métodos ensaiados no laboratório.

Figura 7 - Fluxograma das etapas de caracterização da cinza



Fonte: Elaborada pelo autor.

A quantidade da cinza do bagaço da cana-de-açúcar foi coletada para realizar todos os ensaios do programa experimental, sendo de um único lote. A empresa que doou o material para a pesquisa é a COOPERCANA – Cooperativa dos produtores de cana Porto Xavier LTDA., localizada na cidade de Porto Xavier, estado do Rio Grande do Sul.

O processo consiste em alimentar a caldeira com bagaço (figura 8.a - indicado pelas setas), oriundo da moagem, sendo que a quantidade de bagaço que é queimada é controlada pelo operador, que também é responsável pela limpeza (figura 8.b). A queima do bagaço gera vapor, o vapor gerado é utilizado para alimentar uma turbina e essa turbina movimenta um gerador com capacidade de 1500 kW/h. Outra parte do vapor é utilizada para acionar outras duas turbinas que acionam as moendas, responsáveis pelo processo de moagem do bagaço.

Figura 8 - Vista externa da caldeira



Fonte: Coopercana (2019).

Nota: a. Alimentação da caldeira. b. Limpeza dos rejeitos.

O atual sistema da cooperativa não é autossustentável, ou seja, a cooperativa precisa comprar mais energia para o seu funcionamento.

A queima do bagaço, gera a cinza, essa cinza sai pelo lavador de gases (figura 9.a), onde passa por um processo de lavagem de gases e, após essa atividades, a fumaça sai pela chaminé; a cinza lavada é destinada para um tanque de decantação (figura 9.b).

Figura 9 - Processo de lavagem de gases



Fonte: Coopercana (2019).

Nota: a. Lavador de gases. b. Tanque de decantação.

Periodicamente, a cinza é extraída do tanque, retirado o excesso de água e destinada para um depósito a céu aberto (figura 10). A cinza desta cooperativa é destinada para a lavoura, para correção de solo.

Figura 10 - Depósito da cinza na Coopercana



Fonte: Coopercana (2019).

A cinza usada na pesquisa foi colocada em sacos de plásticos a granel, sendo a coleta realizada em vários pontos do depósito de cinza. A cinza residual

possui um alto teor de umidade, em função do processo de lavagem dos gases, e destinação para o tanque e pela exposição ao tempo.

A metodologia que foi adotada para realização da caracterização da cinza, desde o ensaio piloto para o tempo de moagem da cinza, foi o diâmetro do grão, a partir de tempos de moagem. O tempo de moagem de 1 hora do moinho de bolas esféricas, com peso de material de 1 Kg de CBC e 5 kg de material moedor, não atingiu a área superficial específica na pesquisa.

Com o período de moagem de 2 horas, o diâmetro D50 foi menor que 10 μm , tempo esse, adotado como padrão para os demais ensaios e para o material das moldagens dos corpos de provas.

A massa específica da cinza foi caracterizada no LCVmat, com deslocamento de gás hélio, sendo encontrada a média de 2,33 g/cm^3 e desvio padrão de 0,02. Esse valor foi utilizado para equivalência em relação ao cimento, pelo fato de ocorrer a substituição de parte do cimento por cinza.

3.2 MÉTODOS PARA CARACTERIZAÇÃO DA CINZA

A cinza residual coletada na usina para realização da presente pesquisa, possuía um grande teor de umidade. Essa umidade fazia com que os grãos da cinza estivessem aglomerados, aderidos entre eles, necessitando um processo de beneficiamento que foi a moagem.

Para realizar o processo de trituração, e o mesmo ser eficiente, foi necessário a remoção da umidade da cinza. Em função de ser uma quantidade grande de material, optou-se em colocar em recipientes metálicos e acondicioná-los em estufa a 105 °C, por um período médio de 48 à 72 horas.

Aparentemente, havia pouca matéria orgânica (bagaço, folhas, mal calcinadas), porém, foi realizada a segregação, que consiste em peneirar os resíduos orgânicos, na peneira 4,18, apenas para retirar o material mais “grosseiro” da composição, pequenos fios de bagaços, oriundos da queima incompleta.

Segundo a bibliografia estuda sobre moagem da cinza, os moinhos de bolas são amplamente utilizados por pesquisadores, pela característica de maior eficiência no desempenho para granulometrias mais finas em comparação a outros moinhos. O moinho de bolas foi o equipamento utilizado para moagem da cinza no presente trabalho, conforme representado na figura 11.

Figura 11 - Moinho de bolas de eixo horizontal



Fonte: Elaborada pelo autor.

Após o processo de trituração, a cinza foi colocada dentro de um tonel, onde foi realizada uma mistura da cinza, que consiste em rolar o tonel com a tampa devidamente fechada, por um período de 3 minutos, com o objeto de homogeneizar a cinza.

Com o processo de beneficiamento completo – coleta, secagem, moagem, peneiramento, homogeneização – foi realizada a caracterização do mesmo, para identificação do material em relação a sua finalidade, ou seja, se a CBC teria características pozolânicas ou como adição mineral, tipo fíler.

3.2.1 Índice de Atividade Pozolânica

Nos ensaios de determinação do IAP, foi utilizado o cimento CP II F - 32, conforme NBR 5752 (ABNT, 2014). Essa técnica avalia a reatividade da CBC e seu potencial para uso ou não como adição mineral.

O processo de moldagem, cura e rompimento dos corpos de provas, foi realizado de acordo com as normas brasileiras em vigência. Uma das exigências da NBR 12653 (ABNT, 2014), para um material possuir características de pozolana, precisa obter mais de 90% da resistência mecânica para um teor de 25% de substituição de cimento por uma pozolana. A resistência dos CP's pode ser analisada na tabela 9 (Apêndice C).

Tabela 9 - Atividade pozolânica da CBC com o cimento aos 28 dias

Traço	Amostra A	Amostra B
CP 1	37,01 MPa	36,65 MPa
CP 2	29,37 MPa	33,33 MPa
CP 3	42,31 MPa	30,23 MPa
CP 4	35,51 MPa	36,10 MPa
Média	36,06 MPa	34,08 MPa

Fonte: Elaborada pelo autor.

Conforme a NBR 5752 (ABNT, 2014), o IAP aos 28 dias deve ser calculado pela equação 10 e o resultado em porcentagem, arredondado ao inteiro, sendo f_{cA} a resistência média referência e f_{cB} a resistência média da pozolana.

$$I \text{ cimento} = \frac{f_{cB}}{f_{cA}} \cdot 100 \quad \text{Equação 10}$$

De acordo com os cálculos, a cinza do bagaço da cana-de-açúcar está com um fator de 95% em relação à média de resistência dos corpos de prova referência.

3.2.2 Condutividade Elétrica

O método proposto por Lùxan et al. (1989) estabelece a atividade pozolânica através da variação da condutividade elétrica. O ensaio avalia a diferença de condutividade elétrica no intervalo de tempo de 2 minutos da inclusão da cinza à mistura. O método classifica o material ensaiado em 3 tipos, sendo sua unidade a variação de miliSiemens por centímetro (mS/cm) (conforme tabela 10):

Tabela 10 - Classificação do método proposto por Lùxan et al. (1989)

Classificação do material	Varição de condutividade (mS/cm)
Não pozolânico	$\Delta C < 0,4$
Pozolanicidade moderada	$0,4 < \Delta C < 1,2$
Alta pozolanicidade	$\Delta C > 1,2$

Fonte: Elaborada pelo autor.

Para os ensaios de condutividade elétrica, foram realizadas 6 amostras diferentes da cinza (tabela 11):

Tabela 11 - Resultados dos ensaios de condutividade elétrica

Amostra	Antes (Δ mS/cm)	Depois (Δ mS/cm)	Diferença
1	5,053	4,435	0,618
2	5,230	3,625	1,605
3	5,300	4,478	0,822
4	5,319	3,496	1,823
5	5,511	4,348	1,163
6	5,541	3,777	1,764

Fonte: Elaborada pelo autor.

Pode-se analisar pela tabela acima, que 50% das amostras avaliadas classificam-se em pozolanicidade moderada e os outros 50% são classificadas com alta pozolanicidade, pela variação da condutividade elétrica pelo método de Lùxan.

3.2.3 Fluorescência de Raio X – FRX

Para a caracterização química da cinza, foi realizado o ensaio de Espectrometria de Fluorescência de Raios X por energia dispersiva para identificar os elementos químicos na amostra. A caracterização por Espectrometria de Fluorescência de Raios X da CBC foi realizada no laboratório de caracterização e valorização de materiais (LCVM), da UNISINOS, no equipamento EDX – 720 SHIMADZU.

Não foram encontrados elementos majoritários na composição da cinza, sendo encontrados Si, Fe, Al, K em menor quantidade (conforme tabela 12).

Tabela 12 - Resultados dos elementos químicos presente na CBC

Nº da análise	Nº da amostra	Elementos majoritários (>50%)	Menor quantidade (5%<x>50%)	Elementos traços (<5%)
EDX 2378	AM 835	-	Si, Fe, Al, K	Ti, Ca, Ba, Mg, P, Mn, S, Zn, Cr, Sr

Fonte: Elaborada pelo autor.

3.2.4 Perda ao Fogo

Para a determinação da perda ao fogo, que consiste em aquecimento da amostra de 5g de cinza em forno mufla a 1000 °C, é avaliada a perda de massa, conforme equação 11, sendo M_i (massa inicial) e M_f (massa final):

$$PF = \frac{M_i - M_f}{M_i} \cdot 100 \quad \text{Equação 11}$$

As amostras de cinza do bagaço da cana-de-açúcar, tiveram um alto índice de perda ao fogo, comparadas ao cimento CP V – ARI (tabela 13), resultando numa grande quantidade de carbono na composição da cinza, justificando a coloração mais escura da mesma.

Tabela 13 - Resultados de Perda ao Fogo

Material	Perda ao Fogo (Média) %	Desvio Padrão
Cimento	3,10	0,026
CBC	23,1	0,085

Fonte: Elaborada pelo autor.

3.2.5 Distribuição Granulométrica

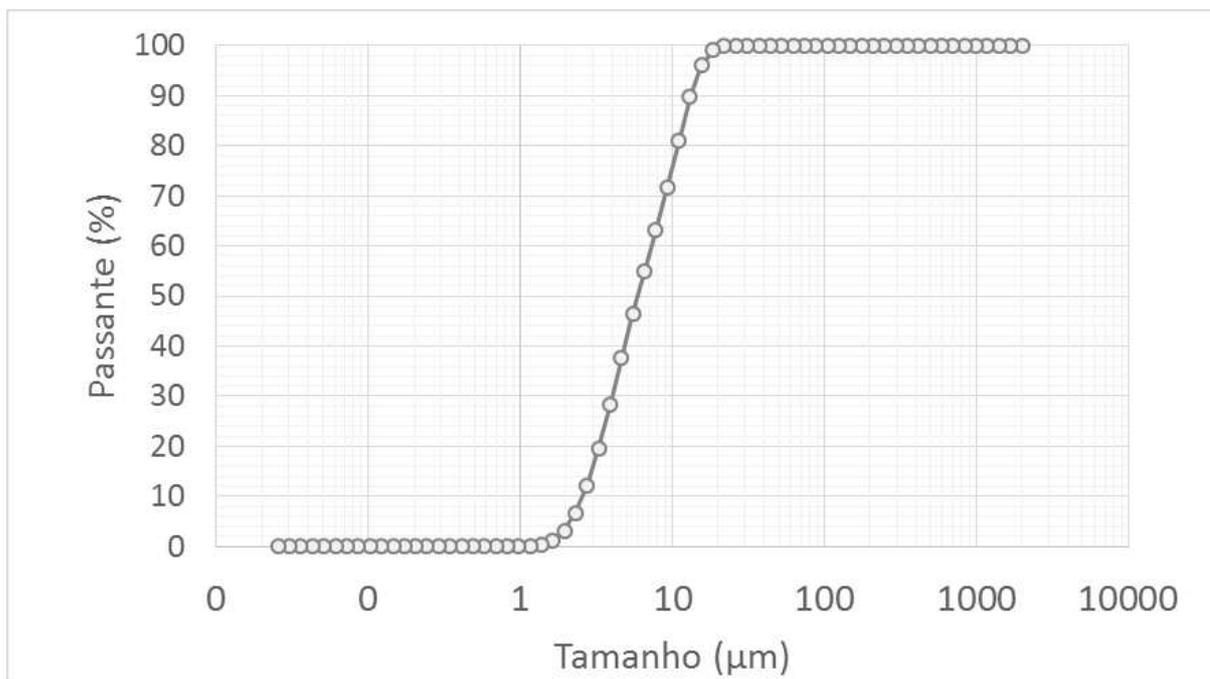
A distribuição granulométrica foi realizada pelo método de difração a laser, foi realizada no laboratório LCVmat, através do equipamento marca MICROTRAG, modelo s3500. A metodologia consiste em dispersar a amostra em água com aditivo superplastificante, colocando na potência de 40w pelo tempo de 60 segundos. A dimensão média (D50) das partículas 5,89µm, pode ser observada na tabela 14 (Anexo A), assim como é observado o gráfico 4 (Apêndice A) de distribuição granulométrica.

Tabela 14 - Dimensão das partículas da CBC

D (%)	10	20	30	40	50	60	70	80	90	95
Tamanho (µm)	2,58	3,30	4,01	4,84	5,89	7,28	8,95	10,82	13,17	15,04

Fonte: Elaborada pelo autor.

Gráfico 4 - Distribuição granulométrica da CBC



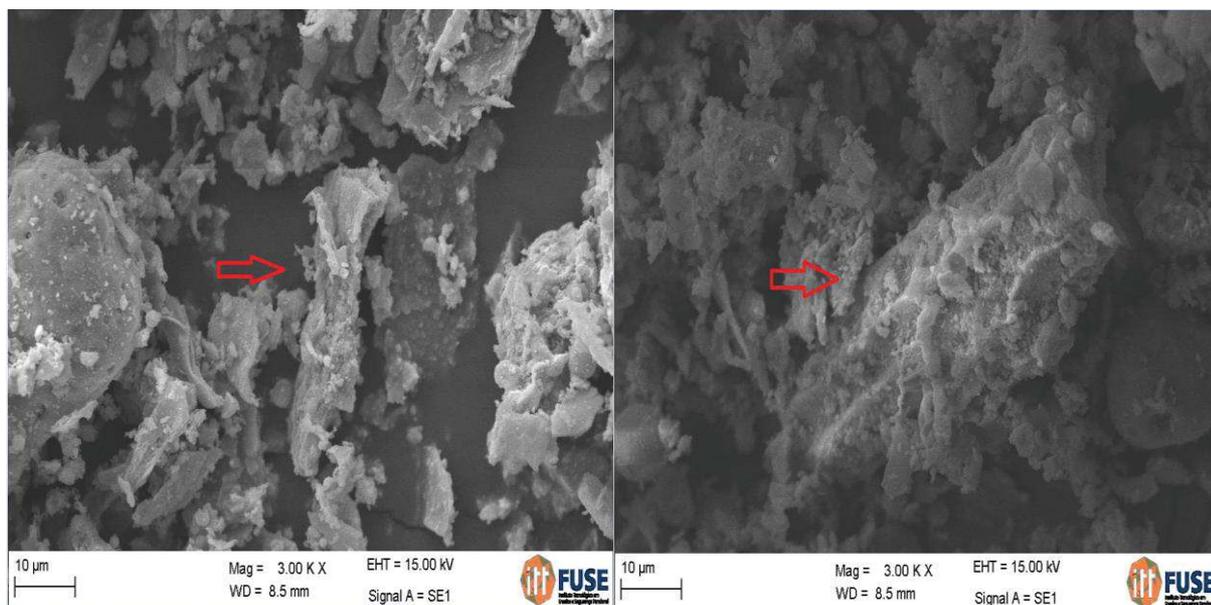
Fonte: Elaborado pelo autor.

3.2.6 Análise de Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV)

A variação do tamanho das partículas de cinza, podem ser observadas pelo método de microscopia eletrônica de varredura. Para isso foram realizadas visualizações das morfologias das partículas, no laboratório do IttFuse – Instituto Tecnológico em Ensaios de Segurança Funcional – da Unisinos. Devido à dificuldade para realizar as análises de microscopia, foram realizadas imagens apenas da cinza moída por 2 horas.

Nas figuras 12.a e 12.b, com ampliações de três mil vezes, observa-se formas circulares, devendo ser atribuídas a capilares da cana. O alto índice de carbono, apresentado pelo ensaio químico de perda ao fogo, pode ser atrelado a pequenas partículas orgânicas, pouco ou mal calcinadas.

Figura 12 - Micrografia com possível evidência de capilares da cana

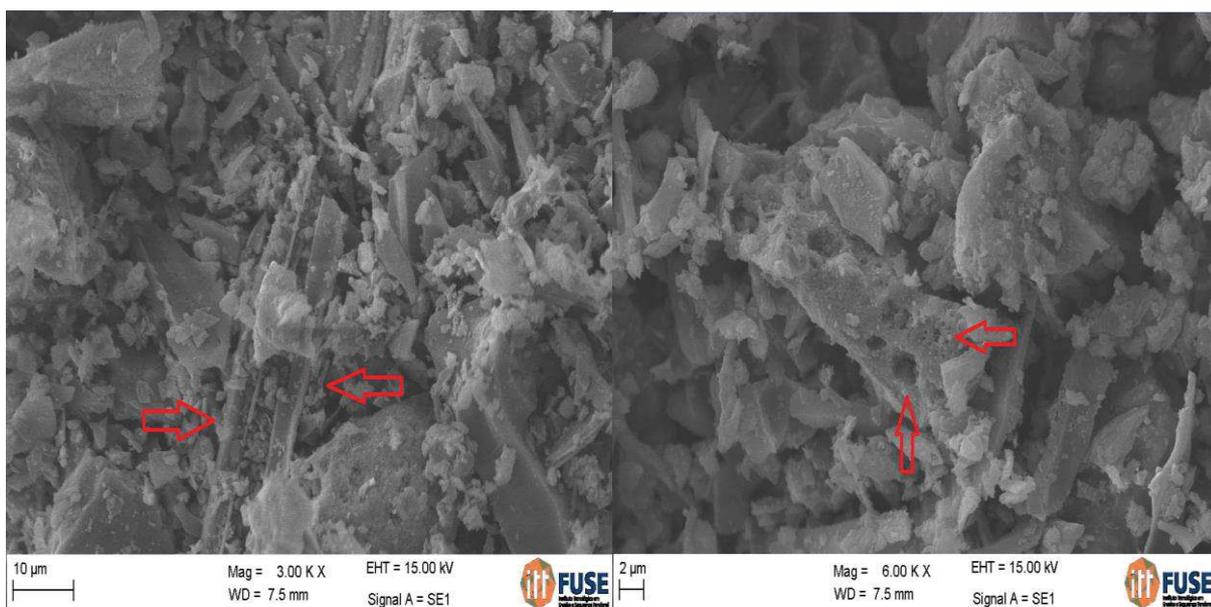


Fonte: Elaborada pelo autor.

Nota: a. Capilar do bagaço. b. Partícula circular.

Outro aspecto observado nas imagens de micrografias (figura 13.a), com aumento de três mil vezes, foram partículas mais compridas e pontiagudas, possivelmente reflexo também da queima incompleta.

Figura 13 - Micrografia com diferentes tipos de partículas



Fonte: Elaborada pelo autor.

Nota: a. Partículas compridas e pontiagudas. b. Meso e micro poros da cinza.

A imagem de micrografia (figura 13.b), com ampliação de seis mil vezes, mostra uma cavidade maior, e algumas menores, possivelmente gerada a partir de uma combinação de meso e micro poros, propriedade do carbono, relatada por Batra et al. (2008), oriunda da do carbono não queimado. Essa característica de partículas compridas e pontiagudas, interfere diretamente no empacotamento da mistura, pelo fato delas não preencherem os espaços vazios.

3.3 PRODUÇÃO DOS CORPOS DE PROVA

Em função do tamanho do programa experimental – com diversidade de traços e a grande quantidade de corpos de prova -, preocupou-se em realizar as moldagens num pequeno intervalo de tempo, de modo a não haver grande diferença de idade entre os exemplares por ocasião do início da carbonatação.

Definiu-se fixar o traço da argamassa em 1:3, sendo 1 o cimento e/ou cimento mais aglomerante, e 3 o agregado miúdo. A tabela 15 apresenta a relação de material utilizado para a moldagem dos corpos de prova.

Tabela 15 - Resumo do material utilizado para moldagem dos corpos de prova.

Traço	Cim. (g)	CBC (g)	Areia (g)	Água (g)	a/agl	Aditivo (g)	Aditivo (%)
REF	6500	-	19500	2600	0,4	46	0,70%
REF	6500	-	19500	3250	0,5	33	0,50%
REF	6500	-	19500	3900	0,6	0,00	0,00%
5% CBC	6175	242,37	19500	2566,95	0,4	61	0,95%
5% CBC	6175	242,37	19500	3208,68	0,5	42	0,65%
5% CBC	6175	242,37	19500	3850,42	0,6	0,00	0,00%
10% CBC	5850	484,73	19500	2533,89	0,4	63	1,00%
10% CBC	5850	484,73	19500	3167,37	0,5	44	0,70%
10% CBC	5850	484,73	19500	3800,84	0,6	00	0,00%
20% CBC	5200	969,46	19500	2467,79	0,4	100	1,20%
20% CBC	5200	969,46	19500	3084,73	0,5	49	0,80%
20% CBC	5200	969,46	19500	3701,68	0,6	00	0,00%
30% CBC	4550	1454,20	19500	2401,68	0,4	300	1,60%
30% CBC	4550	1454,20	19500	3002,10	0,5	66	1,10%
30% CBC	4550	1454,20	19500	3602,52	0,6	30	0,50%

Fonte: Elaborada pelo autor.

Para alcançar a consistência da argamassa foi utilizado aditivo superplastificante, sendo determinado pela medida do espalhamento de uma porção de argamassa realizada por meio de ensaios de mesa de consistência (Flow Table), de acordo com os princípios da NBR 13276 (ABNT, 2016).

Foi determinada a densidade de massa da argamassa no seu estado fresco, afim de se comparar os demais traços com substituição de cinza, podendo ser observado na tabela 16 que, com exceção do traço 20% CBC – a/agl 0,4, todas as demais tiveram semelhança nos resultados.

Tabela 16 - Ensaio no estado fresco das argamassas

Traço	a/agl	Densidade (g/cm³)	Flow Table (mm)
REF	0,4	2,18	208
REF	0,5	2,17	223
REF	0,6	2,14	283
5% CBC	0,4	2,20	205
5% CBC	0,5	2,13	248
5% CBC	0,6	2,17	247
10% CBC	0,4	2,17	203
10% CBC	0,5	2,19	248
10% CBC	0,6	2,18	233
20% CBC	0,4	1,49	215
20% CBC	0,5	2,20	248
20% CBC	0,6	2,17	216
30% CBC	0,4	2,18	215
30% CBC	0,5	2,19	240
30% CBC	0,6	2,13	240

Fonte: Elaborada pelo autor.

3.3.1 Produção dos Corpos de Prova para Ensaio Mecânico

Para a produção dos corpos de prova, foram realizados o traço de referência, e quatro traços com substituição do cimento Portland por cinza, no teor de 5%, 10%, 20% e 30%, devido a grande maioria da literatura sugerir a substituição até esse

último teor. Sendo que para cada teor de substituição, foram avaliadas 3 relações água cimento, sendo as relações 0,4; 0,5; e 0,6. Conforme visualizado na tabela 17:

Tabela 17 - Variáveis para avaliação das propriedades mecânicas

Idades	7	28	63			
Quant. CP's	3	3	3			9 Cp's
Relação a/agl	0,4	0,5	0,6			X3
Substituição	0%	5%	10%	20%	30%	X5

Fonte: Elaborada pelo autor.

Os corpos de provas foram moldados conforme a NBR 5738 (ABNT, 2016), sendo modelados corpos de prova prismáticos 60x60x180 cm para avaliação das propriedades mecânicas de resistência à compressão. Os corpos de provas foram criados para a determinação da resistência mecânica no laboratório LMC, pertencente à UNISINOS.

3.3.2 Produção dos Corpos de Prova para Ensaio de Durabilidade

Os corpos de prova de argamassa utilizados são prismáticos, com dimensões de 60x60x180 mm, sendo moldados para avaliação da carbonatação em argamassa de CBC. O traço foi o mesmo da avaliação mecânica. A opção de realizar sem o agregado graúdo, foi definida para minimizar a influência do mesmo, pois este pode atuar como barreira na frente de carbonatação, gerando maior dispersão nos resultados, conforme Pauletti et al. (2007) e Kulakowski (2002).

Para a determinação da carbonatação foram utilizados 2 corpos de prova para cada combinação entre teor de substituição e relação água/aglomerante. As idades onde a carbonatação foi avaliada foram aos 28, 63, 121 e 149 dias (tabela 18).

Tabela 18 - Variáveis para avaliação da carbonatação em argamassas com CBC

Idades	28	63	121	149		
Quant. CP's	2	2	2	2		8 Cp's
Relação a/agl	0,4	0,5	0,6			X3
Substituição	0%	5%	10%	20%	30%	X5

Fonte: Elaborada pelo autor.

3.4 CURA

Logo após a moldagem dos corpos de prova, os mesmos foram levados à sala de cura, com temperatura controlada de $21\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 2\text{ }^{\circ}\text{C}$. Após as primeiras 24 horas, os CP's foram desformados e identificados conforme o seu traço. Após a identificação, os mesmos foram colocados em tanques com água saturada e cal, em sala de temperatura controlada.

A cura dos corpos de prova foi realizada em sala de cura submersa até a idade de ensaio de resistência a compressão axial. O processo de cura dos compostos cimentícios é um dos fatores importantes, uma vez que o processo químico gera calor de hidratação na matriz cimentícia, principal fonte de microfissuras.

Pauletti (2009) constata que aumentando o período de cura submersa, há uma tendência na diminuição da profundidade de carbonatação, resultante da umidade na matriz cimentícia estar em condições adequadas para o desenvolvimento das reações de hidratação e, conseqüentemente, diminuindo as retrações por secagem, que formam as fissuras.

3.5 SAZONAMENTO

As amostras submetidas a análise de durabilidade, após o período de cura de 28 dias, passaram por um processo de pré-secagem. Para realizar os ensaios de carbonatação, os corpos de prova foram submetidos a sazonalamento com o objetivo de estabilizar a umidade interna em 60% e garantir a distribuição homogênea da umidade do corpo de prova, especificado pelo método RILEM TC 116 PCD (1999). De acordo Masazza (1998), a carbonatação atinge valores de umidade ideal entre 50% e 70%, por isso, adotou-se na presente pesquisa, um teor intermediário de 60% de umidade relativa.

Sendo assim, as amostras foram retiradas da cura submersa, onde foram secas superficialmente e pesadas. Após esse procedimento, foram acondicionadas em uma estufa a $50\text{ }^{\circ}\text{C}$, permanecendo na mesma pelo tempo necessário para atingir a umidade interna de 60%, devendo perder 40% de umidade (Apêndice E).

Para cada combinação de substituição de cinza e para cada relação a/agl foi rompida uma amostra em frações pequenas, para não perder nenhum pedaço da

mesma. A mostra foi pesada e encaminhada para secagem em estufa a 100 °C até que não havia variação maior que 0,5 g e após foi novamente pesada, com isso calculou-se a perda de massa para cada corpo de prova, verificando-se quanta massa deveria perder para ter umidade interna de 60%, conforme especificado na pesquisa.

Na sequência, todos os corpos de prova foram secados em estufa a 50 °C até atingirem a umidade interna de 60%. À medida que as amostras foram chegando na massa calculada, para a umidade solicitada na pesquisa, as mesmas foram embaladas em embalagem impermeável (figura 14), para que não ocorresse a troca de umidade com meio externo, e novamente acondicionadas em sala climatizada na temperatura de 23 °C.

Figura 14 - Corpos de provas em sazonalamento em balagens impermeáveis.



Fonte: Elaborada pelo autor.

Um cuidado que se teve, foi com a identificação de cada amostra. Optou-se em identificar com letra os corpos de prova, logo após a desforma nas primeiras 24 horas. A identificação foi feita em relação ao tipo de traço – REF, 5%, 10%, 20% e 30%-, a relação a/agl – 0,4, 0,5 e 0,6 - e a letra da amostra.

Esse período de redistribuição de umidade, onde a partir da última amostra ensacada, contabilizou o período de 33 dias, até que iniciou-se o ensaio de carbonatação acelerada. As medidas de carbonatação foram realizadas de acordo com as recomendações de RILEM CPC 18 (1988), que consiste no uso de um indicador químico de fenolftaleína para determinação das zonas com diferentes

níveis de pH. Esse método é amplamente utilizado na literatura, devido a praticidade de aplicação e avaliação e pelo baixo custo.

3.6 CÂMARA DE CARBONATAÇÃO

Após a redistribuição da umidade interna dos corpos de prova, as amostras foram encaminhadas à câmara de carbonatação acelerada. A porcentagem de CO₂ foi de 1%, sendo que a medição da carbonatação foi determinada nas idades de 28, 63, 121 e 149 dias.

Teve-se a preocupação de acondicionar as amostras conforme o traço, relação a/agl e sua identificação de letras, conforme figura 15. As mesmas foram locadas, de forma que quando fosse realizada a leitura de carbonatação, não precisasse ficar procurando a amostra requerida.

Figura 15 - Acondicionamento das amostras na câmara de carbonatação



Fonte: Elaborada pelo autor.

A câmara foi alimentada por uma mistura de ar e CO₂, sendo o ar capturado no meio externo e o CO₂ por cilindros de gás carbônico puro, ocorrendo a mistura e homogeneização antes de entrar na câmara

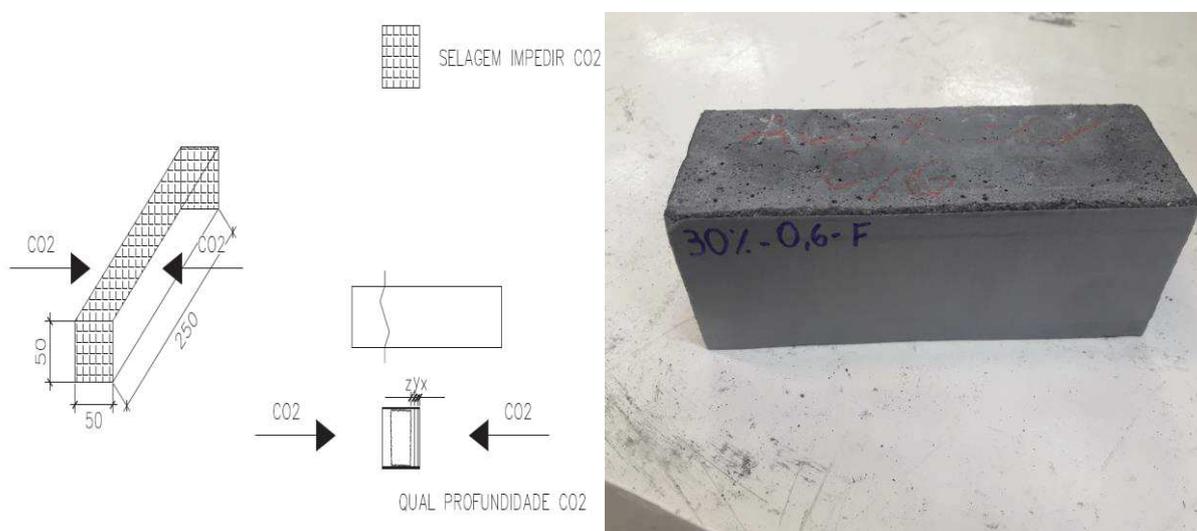
A medição da carbonatação foi realizada através da aspensão de fenolftaleína, um indicador alcalino, sendo que na área avaliada, os compósitos cimentícios pode apresentar uma coloração incolor, possuindo alcalinidade abaixo

de 8 pH, uma cor rosa entre o pH 8 e 10 e uma cor carmim ou roxa na superfície, com pH entre 10 e 12.

Para determinar a profundidade de carbonatação, foi preparada uma solução de 100 ml fenolftaleína. A solução consistiu na mistura de 1 g de fenolftaleína, 29 gramas de água e o volume restante foi completado com álcool etílico absoluto.

Foi realizado um modelo de selagem das faces (figura 16.a), inferior e superior dos corpos-de-prova com fita tape 3m, para impedir a penetração de CO₂, de modo a “direcionar” a frente de carbonatação (figura 16.b).

Figura 16 - Modelo de selagem dos corpos de provas para carbonatação



Fonte: Elaborada pelo autor.

Nota: a. Modelo de selagem. b. Corpo de prova selado.

Por mais que seja amplamente utilizado na literatura a aspersão de fenolftaleína em amostras de compósitos cimentícios submetidos a análises, esse método indica a redução do pH, e não da carbonatação. Paiva (2016) atribui que a aspersão do indicador químico, não indica a ausência do carbonato de cálcio ou do hidróxido de cálcio, e sim, a ausência da coloração no substrato, que se induz a valores de pH inferiores a 9,5.

A umidade foi garantida pela presença de uma solução de 50% de Brometo de sódio, em um recipiente no fundo da câmara de carbonatação, para que a umidade interna da câmara de carbonatação acelerada se mantivesse em 60%, sendo que a umidade foi monitorada periodicamente, com aparelho eletrônico tinytag. Por duas vezes foi adicionado cloreto para a estabilização da umidade.

Para cada idade de carbonatação, foram analisados três corpos de prova para cada traço, sendo que um mesmo corpo de prova foi utilizado para avaliação de três idades, como é possível verificar na figura 17 (os exemplares de cada coluna correspondem a um mesmo traço).

Figura 17 - Visualização dos corpos de prova após aspersão de fenolftaleína.

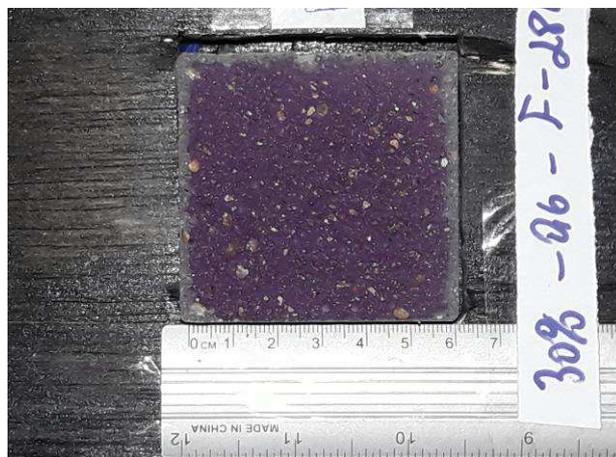


Fonte: Elaborada pelo autor.

A avaliação da profundidade de carbonatação, foi realizada em duas etapas, uma parte no laboratório, e a outra parte com auxílio computacional, para a medição da área carbonatada.

A avaliação feita em laboratório, consistia em retirar a amostra da câmara, fragmentar um terço da mesma na prensa manual, e aspergir a face rompida com fenolftaleína. Após reação do mesmo, a amostra era fotografada (figura 18).

Figura 18 - Identificação das imagens



Fonte: Elaborada pelo autor.

A fotografia das amostras foi padronizada por um “porta fotos” (figura 19), com objetivo de todas as imagens terem a mesma escala e um padrão para todo o programa experimental.

Figura 19 - Porta fotos para fotografar as amostras



Fonte: Elaborada pelo autor.

A segunda parte das análises das amostras foi realizada com auxílio do Autocad, onde a imagem da amostra carbonatada foi inserida e escalonada no programa (figura 20.a). Com isso, foi feito um contorno por dentro da imagem, da parte carbonatada – através da diferença de cores -, nas duas faces, para quantificar a área carbonatada, amostra por amostra (figura 20.b):

Figura 20 - Análise computacional da área carbonatada



Fonte: Elaborada pelo autor.

Nota: a. Amostra inserida no Autocad. b. Análise da área carbonatada.

4 APRESENTAÇÃO, ANÁLISE E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

Nesse capítulo serão apresentados os resultados dos ensaios que foram realizados durante o programa experimental. Buscou-se da melhor forma expor os resultados encontrados, para poder comparar e contribuir com os resultados existentes na literatura.

A medida em que foram sendo obtidos os resultados da presente pesquisa, procurou-se comparações com a literatura, no entanto, houve dificuldades na comparação dos mesmos, devido a diversidade de metodologias e materiais que demais autores trabalharam.

4.1 PROPRIEDADES MECÂNICAS

Com base nos resultados adquiridos no laboratório, montou-se um banco de dados em sistema computacional, com auxílio da ferramenta Excel.

Ressalta-se que, para cada resultado expressado, realizou-se uma média de quatro rupturas. As informações apresentadas na tabela 19 ilustram os valores médios de resistência à compressão de todos os teores de substituição de cimento por cinza do bagaço da cana-de-açúcar, assim como os diferentes teores de relação a/agl (Apêndice D).

Tabela 19 - Resultados da resistência à compressão axial média

Traços	Relação a/agl	7 dias (MPa)	Desvio padrão	Coefficiente de variação	28 dias (MPa)	Desvio padrão	Coefficiente de variação	63 dias (MPa)	Desvio padrão	Coefficiente de variação
REFERÊNCIA	0,4	39,28	3,95	0,10	42,68	8,07	0,19	46,58	14,38	0,31
REFERÊNCIA	0,5	24,28	1,07	0,04	33,51	1,28	0,04	38,16	1,69	0,04
REFERÊNCIA	0,6	20,63	2,57	0,12	24,30	1,75	0,07	35,85	2,20	0,06
5% - CBC	0,4	31,51	4,53	0,14	38,65	4,41	0,11	52,63	3,23	0,06
5% - CBC	0,5	29,29	4,57	0,16	35,05	10,87	0,31	47,41	2,63	0,05
5% - CBC	0,6	25,28	5,28	0,21	29,11	4,18	0,14	43,60	4,47	0,10
10% - CBC	0,4	27,81	1,52	0,05	37,92	4,09	0,11	53,18	2,12	0,04
10% - CBC	0,5	-	-	-	31,69	1,21	0,04	52,31	1,83	0,04
10% - CBC	0,6	25,27	1,70	0,07	26,94	2,07	0,08	38,87	0,52	0,01
20% - CBC	0,4	30,75	6,34	0,21	36,59	7,71	0,21	51,61	3,00	0,06
20% - CBC	0,5	26,83	2,56	0,10	32,76	5,92	0,18	46,79	1,17	0,03
20% - CBC	0,6	17,63	3,37	0,19	24,79	1,39	0,06	38,69	1,97	0,05
30% - CBC	0,4	29,03	3,18	0,11	30,83	5,24	0,17	40,93	1,87	0,05
30% - CBC	0,5	23,26	3,38	0,15	30,98	6,70	0,22	34,84	4,73	0,14
30% - CBC	0,6	16,30	2,32	0,14	25,14	1,41	0,06	31,28	2,35	0,08

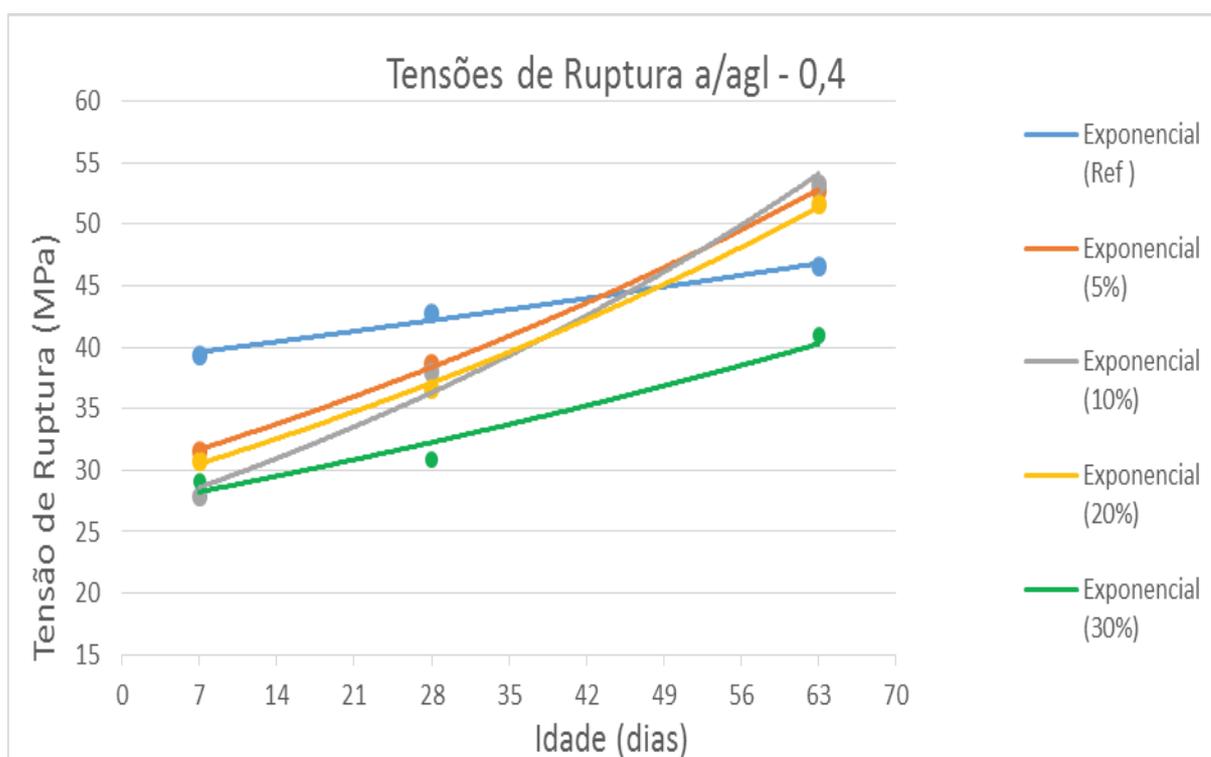
Fonte: Elaborada pelo autor.

Nota: - Valor espúrio.

4.1.1 Análise da Resistência para cada Relação Água/Aglomerante

A primeira análise de dados feita, foi em relação a resistência à compressão axial média pelo tempo, na idade de 7, 28 e 63 dias. Analisando a relação a/agl 0,4, a mais baixa avaliada até a idade de 28 dias, houve um crescimento de resistência regular em todos os traços (gráfico 5).

Gráfico 5 - Resistência à compressão ao longo do tempo na relação a/agl 0,4



Fonte: Elaborado pelo autor.

Todavia, a partir da idade de 28 dias, os traços com substituição de até 20% de CBC, obtiveram uma resistência maior que o traço referência. Fato esse avaliado por Paula (2006), onde conclui-se que a reatividade entre a sílica da cinza e os hidróxidos do cimento ocorre em reação secundária, e, portanto, não aparece nas idades iniciais, proporcionando um aumento nas propriedades mecânicas, ou seja, um aumento de resistência.

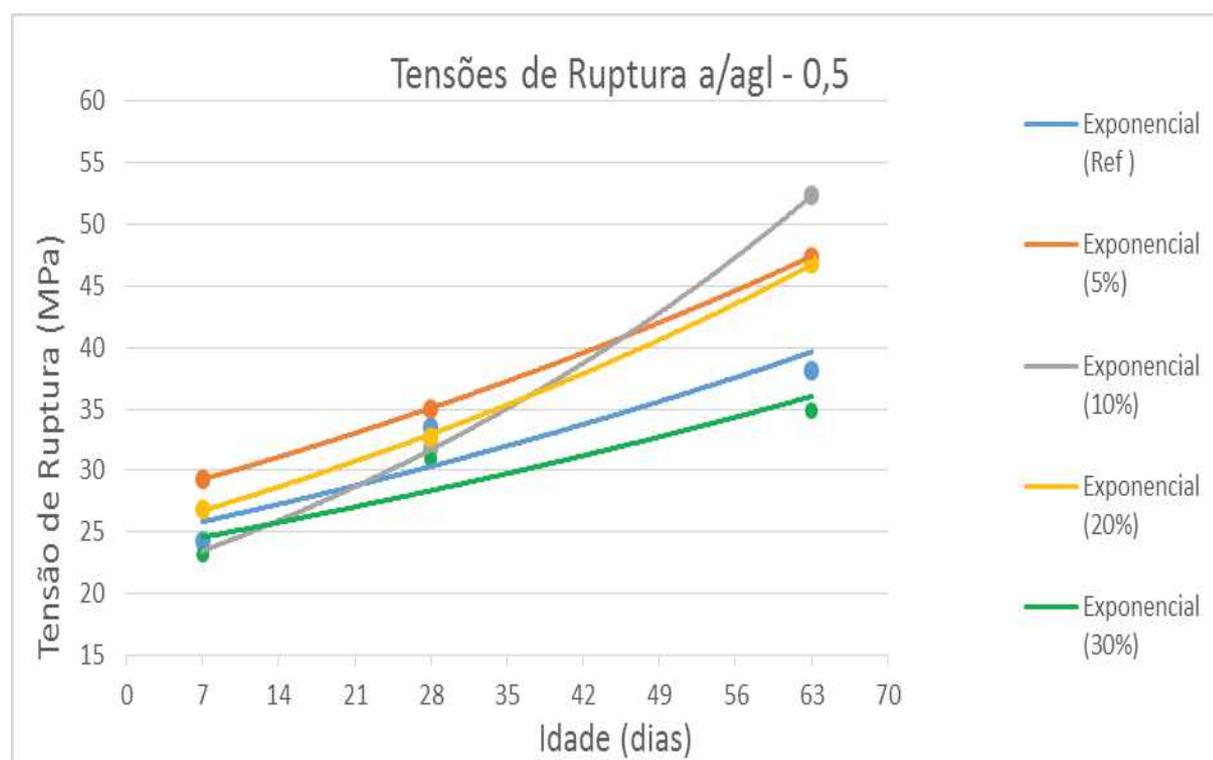
Freitas (2005) relata que o efeito do aumento da resistência pode ser influenciado pelo efeito fíler, em função de uma diminuição do tamanho do grão, resultando numa maior área de superfície de contato dos grãos da cinza.

Por mais que a norma estabeleça a idade de 28 dias para avaliação de propriedades mecânicas, a avaliação de compostos cimentícios com pozolanas, seria após essa idade, pelo fato das reações verificadas na presente pesquisa, até na idade de 63 dias, como já sugeridos por mais autores (TAYLOR 1997; PAIVA 2016).

Observa-se ainda pelo gráfico 5, que o teor de substituição de 30% de CBC também apresenta um aumento de resistência ao logo do tempo, porém, não obtém uma resistência maior do que o da referência.

Analisando os dados com a relação a/agl 0,5 (intermediária), os traços com substituição de cimento Portland por cinza do bagaço da cana-de-açúcar na proporção de até 20%, possuem uma resistência média maior do que a referência para idade de 63 dias (gráfico 6).

Gráfico 6 - Resistência à compressão ao longo do tempo na relação a/agl 0,5



Fonte: Elaborado pelo autor.

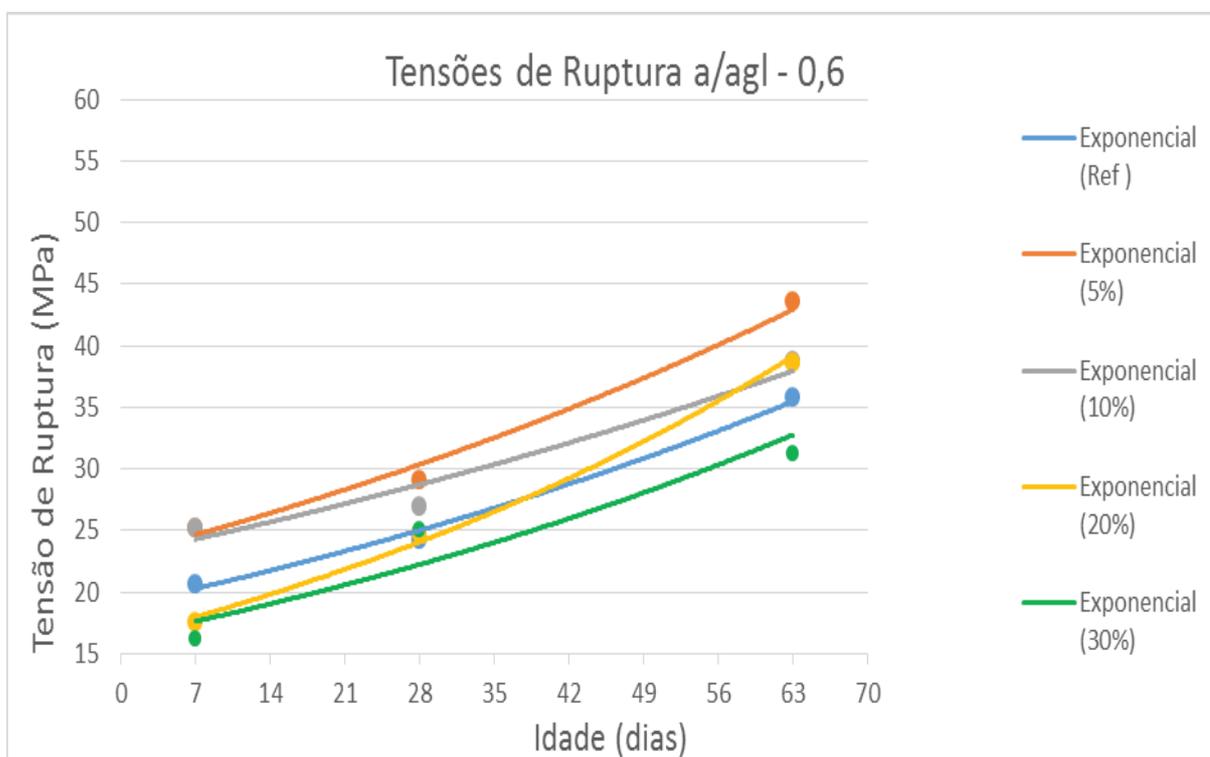
Ainda segundo o gráfico 6, pode-se observar que os traços com substituição de 5% e 10%, obtiveram uma resistência maior que o traço referência, já nas primeiras idades – 7 dias e 28 dias - sendo que esse fato corrobora para o entendimento dos acontecimentos da microestrutura. Esse efeito contribuiu para a

influência do empacotamento da mistura, em razão que a cinza preenche as partículas entre os grãos de cimento, por serem mais finos, aumentando a capacidade da mistura, como também visto por Souza (2011).

Assim como ocorrido na relação a/agl 0,4, o traço com substituição de CBC obteve um aumento na resistência após a idade de 28 dias, fato esse devido às reações pozolânicas que acontecem, prioritariamente, após a idade de 28 dias.

Na relação a/agl 0,6, nota-se que a resistência mecânica para os traços com substituição de 5% e 10%, possuem maiores resistências que o traço referência (gráfico 7), fato esse observado também por AGASSI (2011).

Gráfico 7 - Resistência à compressão ao longo do tempo na relação a/agl 0,6



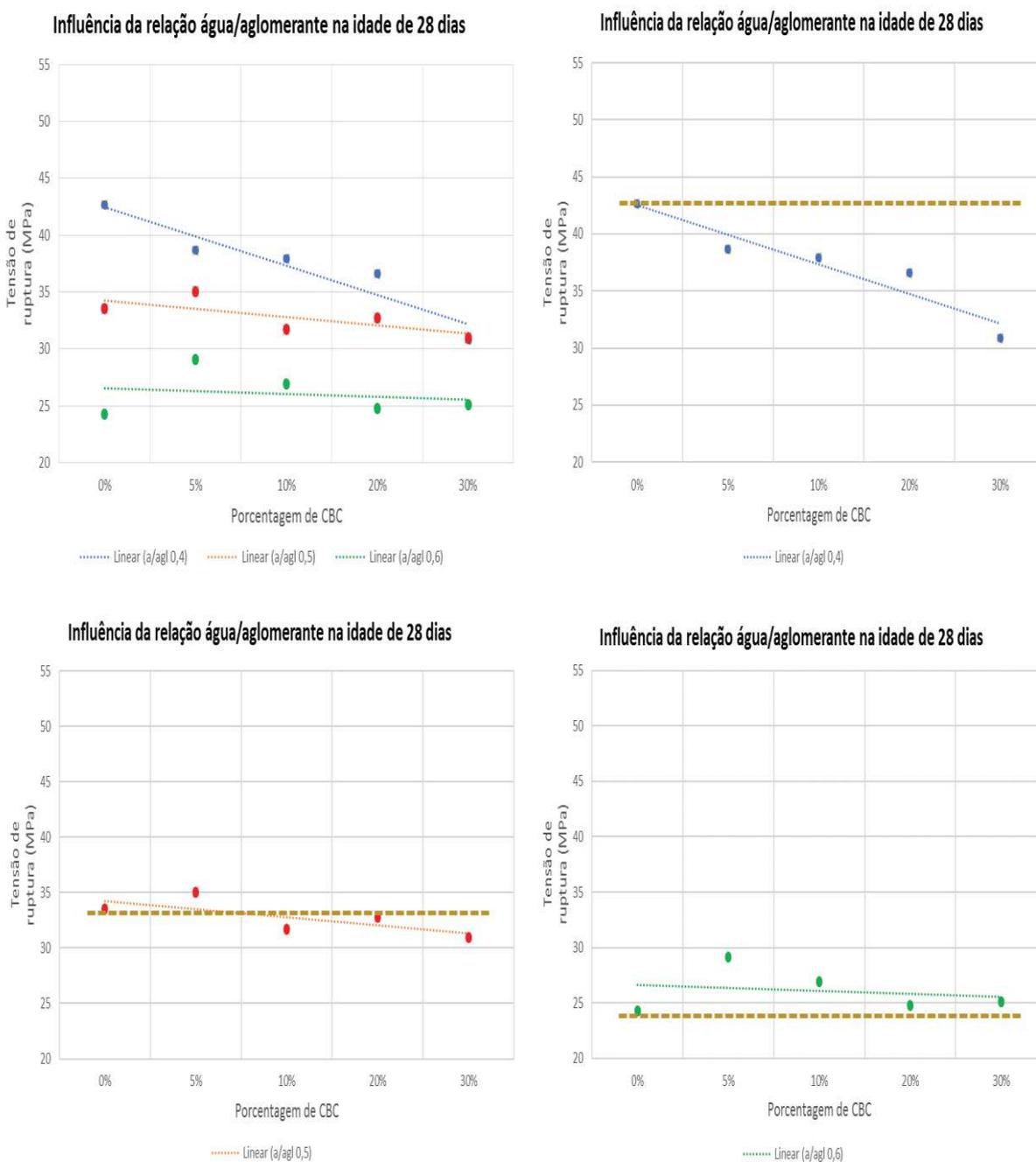
Fonte: Elaborado pelo autor.

Para as três relações a/agl diferentes, em todas elas assegurou-se o teor de substituição de 30% de CBC, manteve-se com as resistências mais baixas, comparadas aos demais teores de substituição, fato esse já observado por PAULA (2006).

4.1.2 Influência da Relação Água/Aglomerante na Resistência a Compressão Axial

De acordo com a literatura, a relação a/agl tem influência direta no que se refere à porosidade. De acordo com o gráfico 8, todos os traços têm um decréscimo na resistência à compressão axial, à medida que se aumenta a relação a/agl.

Gráfico 8 - Influência da relação a/agl na resistência mecânica aos 28 dias



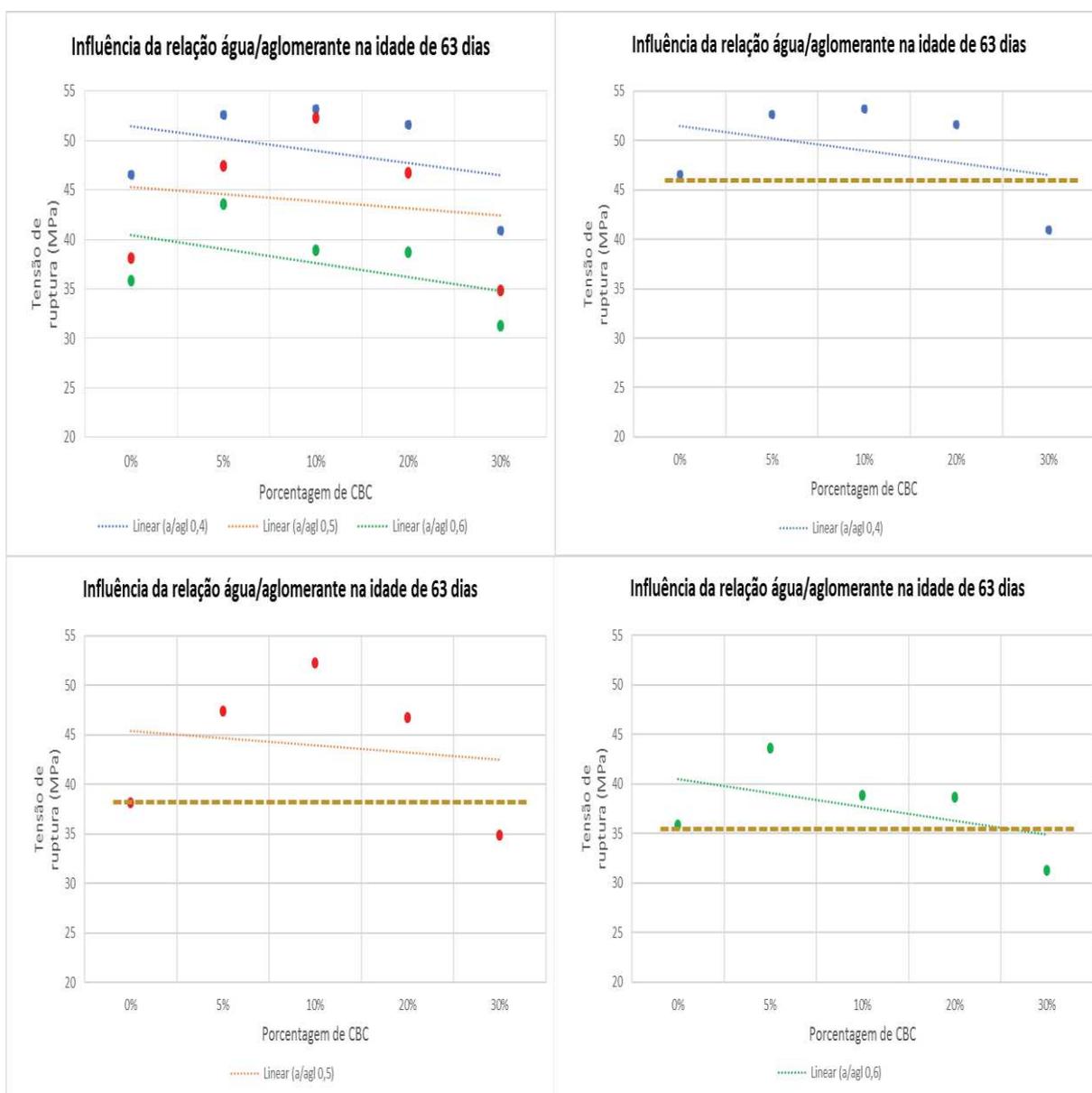
Fonte: Elaborado pelo autor.

Nota: a. Três relações a/agl. b. Relação a/agl 0,4. c. Relação a/agl 0,5. d. Relação a/agl 0,6

As linhas de tendência linear, indicam um decréscimo na resistência à compressão com o aumento dos teores de substituição, em função da diminuição do teor de cimento, não compensada com a reação pozolânica até essa idade. O aumento da relação a/agl reduz a resistência à compressão axial na idade de 28 dias, devido a possível formação de uma maior rede de poros.

Para a idade de 63 dias, a substituição de cinza até o teor de 20% aumenta a resistência em todos os teores de relação água/aglomerante, em comparação ao material de referência (gráfico 9).

Gráfico 9 - Influência da relação a/agl na resistência mecânica aos 63 dias



Fonte: Elaborado pelo autor.

Nota: a. Três relações a/agl . b. Relação a/agl 0,4. c. Relação a/agl 0,5. d. Relação a/agl 0,6.

Observa-se que a substituição de 5% para todas as relações a/agl e para substituição de 10% para relação a/agl 0,4 e 0,5 tem um considerável aumento na resistência mecânica, e a partir daí tem-se uma redução na resistência no teor de 20% para todas as relações a/agl, ficando inferiores aos da referência, apenas em substituições superiores a 20%.

O maior decréscimo de resistência mecânica observado pelas linhas de tendência, é em relação à relação a/agl 0,4, possivelmente atrelado a ineficiência da cinza em baixas relações água/aglomerante.

Aos 63 dias, o efeito da reação pozolânica é expressivo e supera a substituição do cimento, até o teor de substituição de 20%, que se configura como o limite a partir do qual ocorre uma inflexão com perda de resistência mecânica.

Comparando-se os gráficos da idade de 28 e 63 dias, constata-se que a idade é um fator preponderante na avaliação da resistência dos exemplares, em função da velocidade da reação pozolânica da cinza do bagaço da cana-de-açúcar. Conclui-se que a cinza corrobora com os processos de reação pozolânicas, resultando em melhorias de propriedades, aumentando a resistência a compressão.

4.2 CARBONATAÇÃO ACELERADA

A presente pesquisa, objetivou estudos referentes a avaliar compósitos cimentícios em traços de argamassa com substituição de parte do cimento por cinza do bagaço da cana-de-açúcar em análises de carbonatação acelerada.

4.2.1 Análise da Profundidade de Carbonatação Acelerada no Tempo

O levantamento da área carbonatada foi realizada no Autocad, o valor das referidas áreas foi inserido em uma planilha de Excel, para poderem ser analisadas e estudadas. Essa análise dos dados por software computacional de desenho, necessita de uma demanda maior de serviço, porém, tende a reduzir os erros e desvios padrão.

A tabela 20 apresenta os valores médios de carbonatação acelerada, de todos os teores de substituição de cimento por cinza do bagaço da cana-de-açúcar, assim como as diferentes relações a/agl (Apêndice F).

Tabela 20 - Resultados da média da carbonatação acelerada (mm)

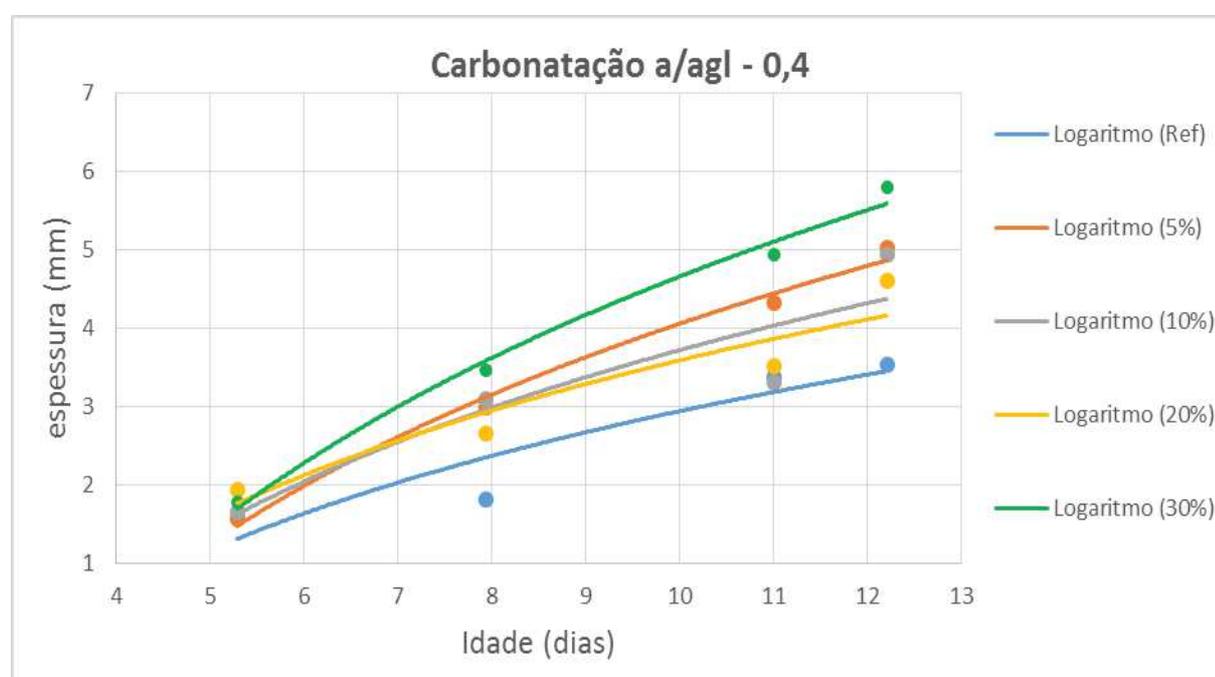
Traços	a/agl	28 dias	Desvio Padrão	Coef. de variação	63 dias	Desvio Padrão	Coef. de variação	121 dias	Desvio Padrão	Coef. de variação	149 dias	Desvio Padrão	Coef. de variação
REF	0,4	1,57	0,39	0,25	1,81	0,19	0,11	3,38	0,10	0,03	3,54	0,04	0,01
REF	0,5	2,04	0,12	0,06	2,54	0,44	0,18	3,66	0,24	0,07	3,90	0,22	0,06
REF	0,6	2,09	0,56	0,27	3,23	0,49	0,15	4,33	0,38	0,09	5,53	0,36	0,06
5% - CBC	0,4	1,56	0,13	0,09	2,98	0,32	0,11	4,33	0,38	0,09	5,03	0,66	0,13
5% - CBC	0,5	2,17	0,44	0,20	3,28	0,09	0,03	3,30	0,35	0,10	4,74	0,41	0,09
5% - CBC	0,6	2,83	0,08	0,03	3,63	0,13	0,04	3,83	0,44	0,11	5,06	0,51	0,10
10% - CBC	0,4	1,66	0,08	0,05	3,09	0,07	0,02	3,31	0,45	0,13	4,94	0,21	0,04
10% - CBC	0,5	1,97	0,22	0,11	2,84	0,26	0,09	3,31	0,27	0,08	4,03	0,07	0,02
10% - CBC	0,6	2,68	0,18	0,07	3,57	0,09	0,02	3,93	0,84	0,21	4,67	0,44	0,09
20% - CBC	0,4	1,94	0,13	0,07	2,66	0,10	0,04	3,51	0,38	0,11	4,60	0,18	0,04
20% - CBC	0,5	1,78	0,16	0,09	3,03	0,25	0,08	3,38	0,15	0,04	4,56	0,33	0,07
20% - CBC	0,6	2,18	0,16	0,07	3,18	0,41	0,13	3,86	0,21	0,05	5,12	0,56	0,11
30% - CBC	0,4	1,78	0,22	0,12	3,46	0,17	0,05	4,93	0,58	0,12	5,79	0,18	0,03
30% - CBC	0,5	2,46	0,37	0,15	3,72	0,40	0,11	5,08	0,39	0,08	6,00	0,47	0,08
30% - CBC	0,6	3,38	0,23	0,07	4,01	0,20	0,05	6,28	0,60	0,09	6,96	0,47	0,07

Fonte: Elaborada pelo autor.

Foram realizadas medidas na idade de 7 dias, entretanto, optou-se em desconsiderar esses dados, pelo motivo da frente de carbonatação ser muito baixa, teoricamente imperceptível. A leitura seguinte foi na idade de 28 dias, idade onde iniciam-se os gráficos, sendo que o momento exato do início da carbonatação de cada traço, é desconhecido.

Analisando o gráfico 10, os traços da relação a/agl 0,4, pode-se observar nitidamente que houve uma área de carbonatação muito inferior no traço referência, em comparação aos traços com substituição, ao longo das idades (Raiz).

Gráfico 10 - Carbonatação ao longo do tempo para relação a/agl 0,4



Fonte: Elaborado pelo autor.

Observam-se três grupos distintos, sendo que o grupo referência possui a menor frente de carbonatação ao longo do tempo, na relação a/agl 0,4. O segundo agrupamento são os teores de substituição de 5%, 10% e 20%, resultando numa carbonatação maior que o referência, apresentando coeficientes de carbonatação similares entre eles.

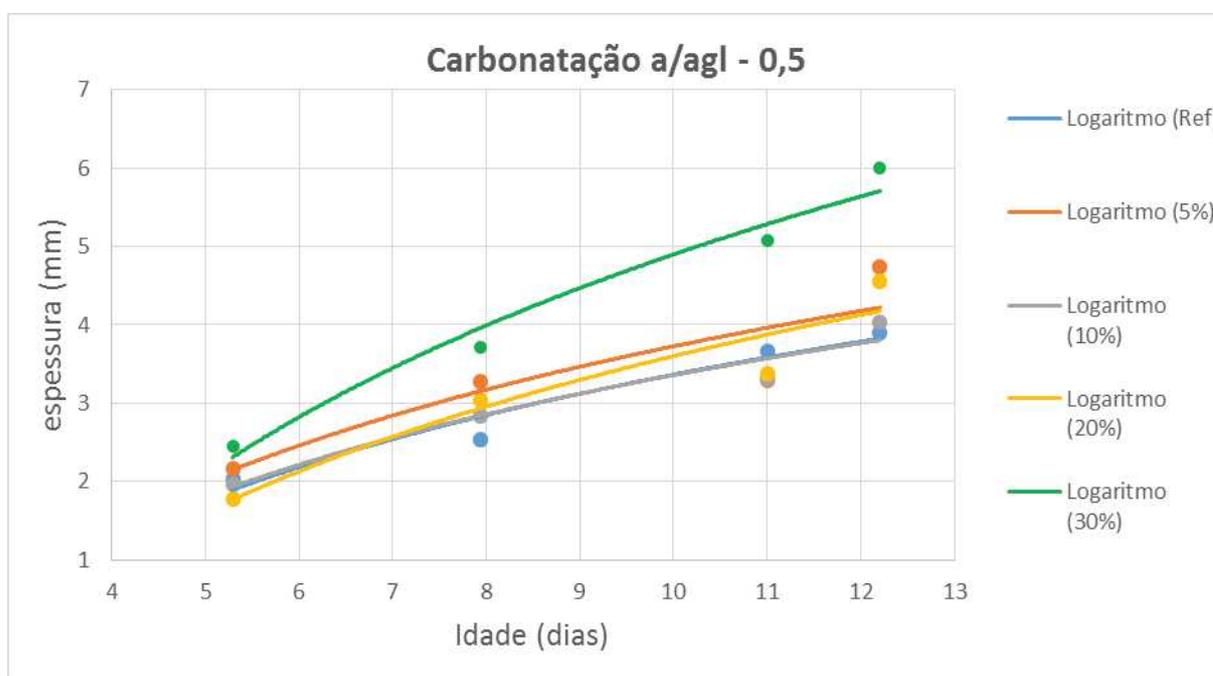
O traço de 30% - terceiro grupo - apresentou uma carbonatação muito superior aos demais. Sendo que esse teor apresentou uma área carbonatada, na idade de 149 dias, 29,15% maior que as demais.

Nas primeiras idades, a maior carbonatação nos traços com substituição é justificada pela menor resistência (que é relacionada com uma maior porosidade).

Contudo, em maiores idades (próximo aos 63 dias) a resistência dos exemplares com substituição se torna maior do que a referência, não mais justificando o comportamento da carbonatação. Nesse momento, a diminuição da reserva de álcalis dos exemplares provenientes das reações pozolânicas aparenta ser o fator que gera maior carbonatação nos exemplares com substituição.

Para a relação a/agl 0,5, o traço com substituição de 10% de CBC possui uma variação irrisória de carbonatação em comparação ao referência, para as idades de 121 e 149 dias (gráfico 11).

Gráfico 11 - Carbonatação ao longo do tempo para relação a/agl 0,5



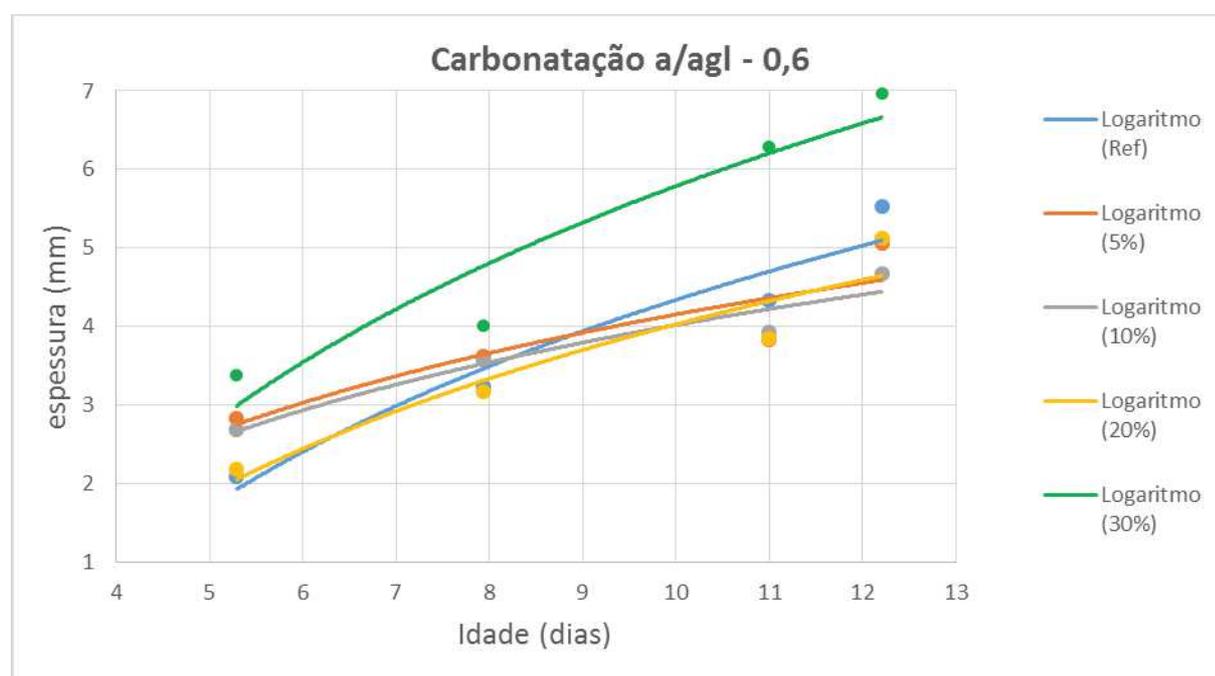
Fonte: Elaborado pelo autor.

Os traços com até 20% de CBC são muito próximos da referência, com pequena diferença em maiores idades, onde ocorre mais carbonatação. Estima-se que a diminuição da reserva de álcalis dos exemplares proveniente das reações pozolânicas é o fator que gera maior carbonatação também nesses exemplares.

Segundo dados mostrados no gráfico 11, o teor de 30% de CBC possui uma frente de carbonatação 53,94% maior em relação ao referência, na idade de 149 dias. Fato esse justificado por SILVEIRA (2010) que afirma que a disponibilidade menor de cimento (devido a substituição) resulta em menor quantidade de hidroxilas disponíveis para a reação pozolânica, e, conseqüentemente, menor reserva alcalina, resultando numa carbonatação mais rápida.

A relação a/agl 0,6 constitui de um teor maior de água na mistura, por conseguinte, uma rede de poros maior e mais conectada na matriz cimentícia endurecida em comparação aos traços com relação a/agl menor. Analisando o gráfico 12, percebe-se que os traços com teores de substituição de 5%, 10% e 20% obtiveram uma profundidade similar de carbonatação comparadas à referência nas idades de 121 dias e 149 dias.

Gráfico 12 - Carbonatação ao longo do tempo para relação a/agl – 0,6



Fonte: Elaborado pelo autor.

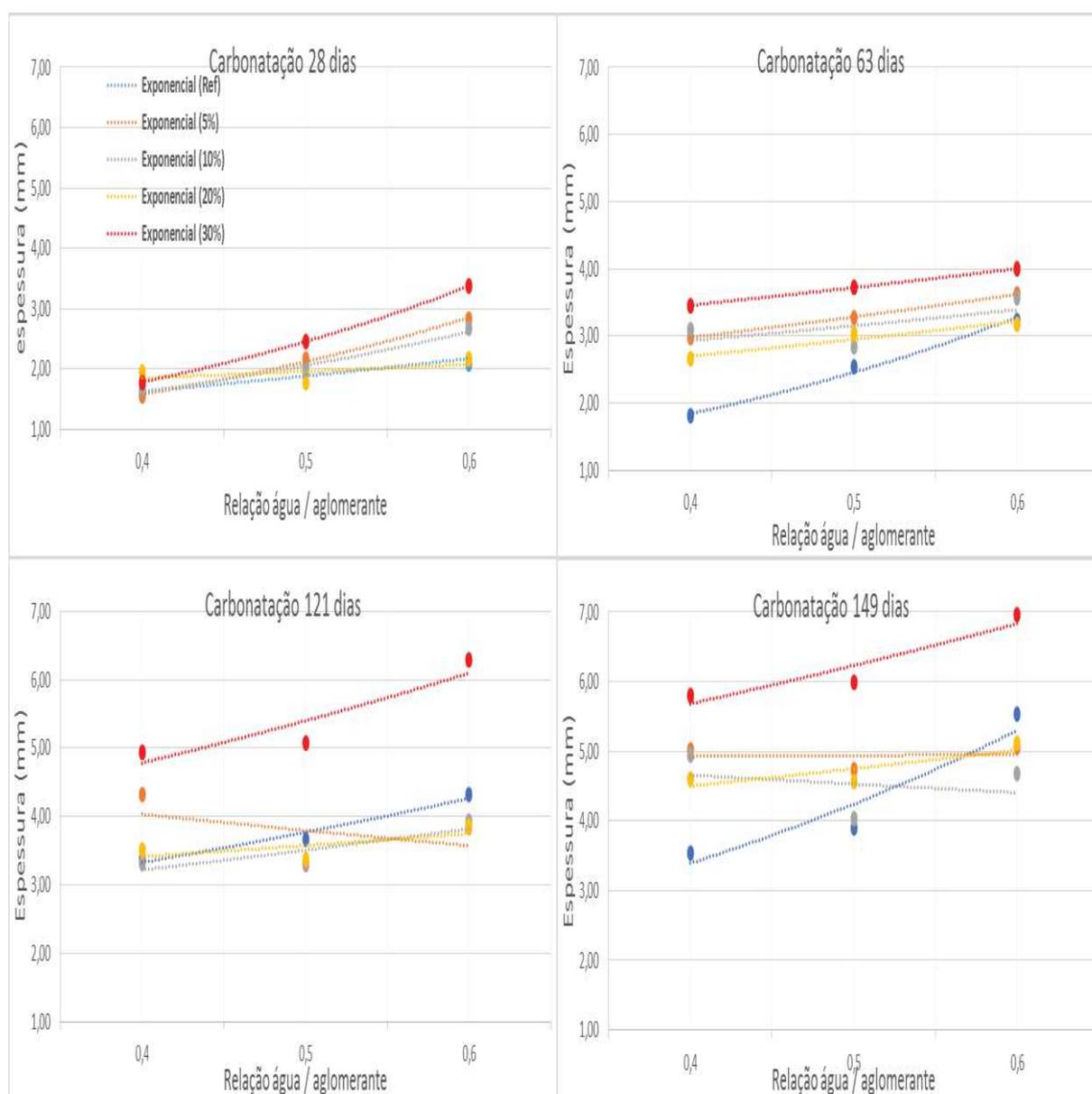
O traço com teor de 5% e 10% obtiveram diferença de profundidade de carbonatação muito pequenas. Possivelmente houve uma menor carbonatação no teor de 5%, pela sua elevada resistência mecânica comparado aos demais traços, resultando num maior fechamento da rede de poros, dificultando a entrada de CO₂, para reagir com os produtos de hidratação do cimento.

Nessa relação água/aglomerante, ao contrário das demais, em maiores idades a carbonatação similar nos exemplares com substituição de 5%, 10%, e 20% é justificada pela maior resistência em relação à referência (que é relacionada com uma menor porosidade) que aparenta superar o efeito da diminuição do teor de álcalis proveniente da reação pozolânica.

4.2.2 Influência da Relação Água/Aglomerante na Profundidade de Carbonatação

O aumento da relação a/agl influi na diminuição da resistência à compressão axial, pelo fato de haver um poro maior e uma rede de poros mais conectada. Para idade de 121 dias, o comportamento das amostras mostra-se muito similar, entre a referência e os teores de substituição de até 20%, para as três relações a/agl (gráfico 13).

Gráfico 13 - Carbonatação para diferentes teores de água/aglomerante no tempo



Fonte: Elaborado pelo autor.

Nota: a. Três relações a/agl. b. Relação a/agl 0,4. c. Relação a/agl 0,5. d. Relação a/agl 0,6.

Constata-se com os gráficos 13.b 13.c e 13.d que a influência da relação água/aglomerante possuiu uma variação muito baixa ao longo das idades. Ressalta-se que a espessura possui uma variação em torno de 5 mm, valor esse estando na margem de erro do ensaio segundo RILEM TC 116 PCD (1999).

Conclui-se ainda que o teor de substituição de 30% apresentou uma eficiência muito baixa se comparada aos demais, pois sua frente de carbonatação foi muito maior em todas as relações a/agl. Assim como nas análises de resistência mecânica, o teor de substituição de 30% resultou em resistências muito abaixo das demais, fato que corrobora para a inviabilidade do uso em teores acima de 20% de cinza de bagaço de cana-de-açúcar por cimento Portland.

5 CONCLUSÃO E CONSIDERAÇÕES FINAIS

O presente capítulo consiste em apresentar as conclusões obtidas por meio das práticas realizados no programa experimental. Essas conclusões corroboram para a literatura, sendo alguns pontos favoráveis e outros desfavoráveis em relação ao emprego da cinza do bagaço da cana-de-açúcar em compósitos cimentícios.

Considerações finais sobre a pesquisa e algumas sugestões para trabalhos futuros, em consonância com o programa experimental, que por razão de uma demanda maior de tempo, não foram realizados nessa pesquisa.

5.1 CONCLUSÕES

A moagem empregada para essa cinza específica pode ser caracterizada como cinza ultra-fina, pois apresentou granulometria média menor que a do cimento, concluindo-se que o processo de moagem de duas horas foi eficiente, não necessitando de um período maior de trituração, o que acarretaria na prática, num maior consumo de recurso financeiro, poluição, uso de combustíveis e tempo.

A resistência à compressão axial dos corpos de prova de argamassa, mostrou-se satisfatória nos traços com emprego da cinza. Um exemplo promissor, foram os teores de 5% e 10% de CBC, na relação a/agl 0,5 e 0,6, em que os mesmos obtiveram uma resistência média maior que o da referência, já nas idades iniciais, conclui-se então que ocorreram reações pozolânicas entre a cinza e os demais produtos de hidratação do cimento.

Infere-se ainda, em relação à resistência a compressão axial, que para a relação a/agl 0,4, a partir da idade de 28 dias, os traços com substituição de até 20% de cinza, obtiveram uma resistência maior que o traço referência. Esse fato concorda com alguns autores da literatura, para os quais a cinza da cana-de-açúcar proporciona um aumento de resistência, em idades mais avançadas, a partir da idade de 28 dias.

A influência da relação a/agl em um traço, é fundamental para as solicitações requeridas para a mesma. Pode-se observar o teor de substituição de 5% nas idade de 28 e 63 dias, comparando a relação a/agl 0,5 e 0,6, houve uma variação muito baixa de resistência, logo para essas relações a/agl, a cinza apresentou um melhor

fechamento dos poros, devido aos grãos da cinza preencherem os espaços do cimento.

O teor máximo de substituição do cimento por cinza do bagaço da cana-de-açúcar, sem perda de resistência mecânica, encontrado nessa pesquisa foi de 20%, o que está de acordo com a maioria da literatura, porém, inferior a teores de até 30%, encontrados por alguns autores em outras cinzas e condições de substituição.

Em relação a propriedade de durabilidade avaliada para os novos compósitos cimentícios, a profundidade de carbonatação nas relações a/agl 0,4, apresentou variação no aumento da carbonatação com idades avançadas, sendo que o traço referência, possui uma carbonatação menor que os demais, devido ao fechamento dos poros, fato que dificulta a frente de carbonatação.

Para a relação a/agl 0,5, o teor de 10% de CBC possui uma variação insignificante de carbonatação se comparado ao referência, nas idades de ensaio de 121 e 149 dias. Constata-se nos traços com substituição a maior carbonatação é justificada pela menor resistência - que é relacionada com uma maior porosidade. A resistência mecânica nos traços com substituição (exceto de 30%) se torna maior que a referência, e a carbonatação também é maior. Portanto, a carbonatação não pode ser explicada pela diminuição da porosidade que acompanha o acréscimo de resistência a compressão. Afirma-se que a diminuição da reserva de álcalis dos exemplares provenientes das reações pozolânicas aparenta ser o fator que gera maior carbonatação nos modelos com substituição.

Para tanto, a cinza possui uma eficiência melhor, para a a/agl 0,6, nos teores de substituição de 5%, 10% e 20% que obtiveram uma profundidade de carbonatação similar ao apresentado pela referência, ressaltando que para o processo de carbonatação, a cinza obteve uma eficiência melhor em maiores relações água/aglomerante.

Já para o teor de 30% de substituição de cimento Portland por cinza do bagaço da cana-de-açúcar possui uma frente de carbonatação maior em todas relações água/aglomerante e teores de substituição. Esse fato pode ser justificado pela disponibilidade menor de cimento (devido a substituição), que resulta em menor quantidade de hidroxilas disponíveis para a reação pozolânica, e conseqüentemente menor reserva alcalina, resultando numa carbonatação mais rápida.

5.2 CONSIDERAÇÕES FINAIS

As propriedades físicas e químicas da cinza do bagaço da cana-de-açúcar podem ser influenciadas por diversos fatores: no cultivo da cana – procedência, tipos de cana cultivada, diferentes formas de colheita, diferentes solos – e na geração da cinza – tipos de caldeira, temperatura de queima, tempo de queima – fatores que estão diretamente ligados aos diferentes resultados encontrados por pesquisadores.

A utilização da cinza para produção de compósitos cimentícios, parece ser uma forma promissora para o aproveitamento desse resíduo, pois, além de utilizar um resíduo da indústria agrícola, a sua aplicação diminui os impactos ambientais da sua extração, sendo um dos benefícios, a redução do consumo de cimento. Contudo, para a utilização da cinza em escala comercial, ainda são necessárias mais pesquisas.

Há muito poucos estudos em relação a durabilidade de compósitos cimentícios, em especial, relativos a ensaios de carbonatação acelerada. Ademais, existe uma enorme dificuldade no quesito de comparação de resultados. Começando pelo tipo de cinza, como já visto ela pode ter diferentes propriedades conforme o processo de geração ou as diferenças de processos de queima. Até mesmo o beneficiamento, tipo e tempos de moagem, interferem na possível comparação entre trabalhos de autores, pois o tipo de cimento pode ser outro, assim como a substituição no traço pode ser por cimento ou areia.

Além de haver poucos resultados de pesquisa em compostos cimentícios com substituição parcial de cimento Portland com ênfase na carbonatação, a sua comparação com demais trabalhos é dificultada pelos motivos anteriores e pela falta de padronizações, como por exemplo, a diferença de teores de CO₂ e de umidade interna da câmara de carbonatação acelerada, dentre outros.

Em função dos resultados experimentais, sugere-se que o emprego da cinza pode se dar em produtos manufaturados, que não sofrem os efeitos negativos da carbonatação (como a despassivação do aço), como pavers, blocos de vedação, murões e demais artefatos de cimento.

5.3 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

- Avaliar a rede de poros verificando o comportamento da cinza nas propriedades físicas dos novos compósitos cimentícios;
- Realizar análises térmicas para verificar se a sílica da cinza está consumindo CH;
- Avaliar o consumo de CO₂ na estrutura devido a carbonatação com substituição de cinza;
- Avaliar o custo benefício da substituição do cimento pela cinza.

REFERÊNCIAS

- AGASSI, JOENILSON DANIEL. **Avaliação da carbonatação em concretos com cinza do bagaço-da-cana-de-açúcar**. 2011. 88 f. Dissertação de Mestrado Universidade Estadual de Maringá, Maringá, PR, 2011.
- AKRAM, T; MEMON, S. A; OBAID, H. Production of low cost self compacting concrete using bagasse ash. **Construction and Building Materials**, v. 23, n. 2, p. 703-712, 2009.
- ALCANTARA, M. A. M.; SANTOS, B. V. D. **O uso de cinzas de bagaço de cana como finos do concreto autoadensável**. In: 53º Congresso Brasileiro do Concreto - IBRACON, Florianópolis, SC, 2012.
- ALMEIDA, F. DO C. R. **Avaliação do Potencial de Corrosão de Armaduras em Concretos com Substituição Parcial do Agregado Miúdo pela Areia de Cinza do Bagaço da Cana-de-açúcar - ACBC**. 2013. 207 f. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, SP, 2013.
- ANJOS, M. A. S.; MARTINELLI, A. E. **Caracterização do resíduo da biomassa da cana-de-açúcar para aplicação em pastas cimentícias**. In: 18º CBECiMat - Congresso Brasileiro de Engenharia e Ciência dos Materiais. Porto de Galinhas, PE, 2008.
- ANJOS, M. A. S.; MOREIRA, H. P.; BORJA, E. V.; PEREIRA, A. C.; NETO, C. A. **Efeito da adição de cinza da biomassa da cana-de-açúcar como finos no concreto autoadensável** In: 52º Congresso Brasileiro do Concreto - IBRACON. Fortaleza, CE, 2010.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 12653**: Materiais pozolânicos: determinação do índice de desempenho com cimento Portland aos 28 dias. Rio de Janeiro, 2014.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 13276**: Argamassa para assentamento e revestimento de parede e tetos – Determinação do índice de consistência. Rio de Janeiro, 2016.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT. **NBR 5738**: Concreto — Procedimento para moldagem e cura de corpos de prova. Rio de Janeiro, 2016.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 5752**: Materiais pozolânicos: determinação do índice de desempenho com cimento Portland aos 28 dias. Rio de Janeiro, 2014.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT. **NBR NM 18**: Cimento Portland – Análise química – Determinação de perda ao fogo. Rio de Janeiro, 2004.

BAHURUDEEN, A.; KANRAJ, D.; GOKUL DEV, V; SANTHANAM, M. Performance evaluation of sugarcane bagasse ash blended cement in Concrete. **Cement and Concrete Composites**, v. 59, p. 77–88, 2015.

BAHURUDEEN, A.; SANTHANAM, M. Influence of different processing methods on the pozzolanic performance of sugarcane bagasse ash. **Cement and Concrete Composites**, v 56, p. 23 – 45, 2015.

BARROSO, T. R. **Estudo da atividade pozolânica e da aplicação em concretos de cinza do bagaço da cana-de-açúcar com diferentes características físico-químicas**. 2011. 146 f. Dissertação em Mestrado. Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro, Campos dos Goytacazes, RJ, 2011.

BATRA, V. S.; URBONAITE, S.; SVENSSON, G. Characterization of unburned carbon in bagasse fly ash. **Fuel**, v. 87, n. 13-14, p. 2972-2976, 2008

BERTOS, M. F; SIMONS, S. J. R; HILLS, C. D; CAREY, P. J. A Review of accelerated carbonation technology in the treatment of cement-based materials and sequestration of CO₂. **Journal of Hazardous Materials**, v. 112, n. 3, p. 193-205, 2004.

BESSA, S. A. L. **Utilização da Cinza do Bagaço da Cana-de-açúcar como Agregado Miúdo em Concretos para Artefatos de Infraestrutura Urbana**. 2011. 181 f. Tese de Doutorado. Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, SP, 2011.

CALDAS, A.; MELO NETO, A. A.; PIRES SOBRINHO, C. W. A.; JOHN, V. M. **O uso de cinzas residuais para produção de novos materiais e componentes construtivos**. In: II Congresso Internacional de Tecnologia e Gestão da Qualidade na Construção Civil, Recife-PE, 2000.

CÂMARA, E. **Efeitos da Substituição Parcial de Agregados Miúdos Por Cinza Residual do Bagaço da Cana-de-Açúcar no Processo de Hidratação do Cimento**. Tese de Doutorado. 2015. 186 f. Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, SC, 2015.

CASTALDELLI, V. N. **Estudo de geopolímeros utilizando cinzas residuais do bagaço de cana-de-açúcar**. 2013. 89 f. Dissertação de Mestrado. Universidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita Filho, Ilha Solteira, SP, 2013.

CHI, M.C. Effects of sugarcane bagasse ash as a cement replacement on properties of mortars. **Science and Engineering of Composite Material**, v. 19, n 3, p. 279 – 285, 2012.

CHUSILP, N.; JUTURAPITAKKUL, C.; KIATTIKOMOL, K. Effects of LOI of ground bagasse ash on the compressive strength and sulfate resistance of mortars”, **Construction and Building Materials**, v. 23, n. 12, p. 3523–3531, 2009.

CIMENTO ITAMBÉ. **Aditivo ou Adição**. Disponível em: <http://www.cimentoitambe.com.br/aditivo-ou-adicao/>. Acesso 23 de outubro de 2017.

COCIÑA, E. V.; MORALES, E. V.; RODRÍGUEZ, R. G.; RUÍZ, J. H. Kinetics of the Pozzolanic Reaction between Lime and Sugar Cane Straw Ash by Electrical Conductivity Measurement: A Kinetic–diffusive Model. **Cement and Concrete Research**, v. 33, n. 4, p. 517–524, 2003.

CONAB – Companhia Nacional de Abastecimento. **Perfil do Setor do Açúcar e do Etanol no Brasil – Edição para safra 2014/15**. Disponível em: < http://www.conab.gov.br/OlalaCMS/uploads/arquivos/17_11_28_16_42_59_perfil_su_croalcool2014e15.pdf>. Acesso em: 25 de outubro de 2017.

CONAB – Companhia Nacional de Abastecimento. **Perfil do Setor do Açúcar e do Etanol no Brasil – Edição para safra 2018/19**. Disponível em: < <https://www.conab.gov.br/info-agro/safras/cana>>. Acesso em: 26 de maio de 2019.

CORDEIRO G. C.; TOLEDO F. R. D.; TAVARES L. M., FAIRBAIRN E. M. R. Pozzolanic activity and filler effect of sugar cane bagasse ash in Portland cement and lime mortars. **Cement and Concrete Composites**, v. 30, p. 410–418, 2008.

CORDEIRO, G. C. **Utilização de Cinzas do Bagaço de Cana-de-açúcar e da Casca de Arroz como Aditivos Minerai s em Concreto**. 2006. 405 f. Tese de Doutorado Universidade Federal do Rio de Janeiro, RJ, 2006.

CORDEIRO, G. C., TOLEDO FILHO, R. D., FAIRBAIRN, E. M. R, TAVARES, L. M., O IVEIRA, C. **Influence of Mechanical Grinding on the pozzolanic Activit of Residual Sugarcane Bagasse Ash**. In: Vzquez E, endricks Ch, anssen GMT, editors. Proceeding of International RILEM Conference on the use of Recycled Materials in Building Structures, n. reference 18, 2004.

CORDEIRO, G. C.; TOLEDO FILHO, R. D.; FAIRBAIRN, E. M. R. Ultrafine sugar cane bagasse ash: high potential pozzolanic material for tropical countries. **Revista IBRACON de Estruturas e Materiais**, v. 3, n. 1, p. 50– 67, 2010.

CORDEIRO, G. C.; TOLEDO FILHO, R. D.; TAVARES, L. M.; FAIRBAIRN, E. M. R. Ultrafine Grinding of Sugar Cane Bagasse Ash for Application as Pozzolanic Admixture in Concret. **Cement and Concrete Research**, v. 39, n. 2, p. 110-115, 2009.

DAL MOLIN, D. C. C. **Adições minerai s para o concreto estrutural**. In: ISAIA, G. C (org). **Concreto: ensino, pesquisa e realizações**. São Paulo: IBRACON, CAP. 12, p. 345 – 379. 2005.

DEPEC – Departamento de pesquisas e estudos econômicos. **Agronegócio Brasil em Foco**. Disponível em: < http://www.economiaemdia.com.br/EconomiaEmDia/pdf/Agroneg%C3%B3cio%20Brasil%20em%20Foco_maio_2014.pdf>. Acesso em 25 de outubro de 2017.

EMBONG, R.; SHAFIQ, N.; KUSBIANTORO, A.; NURUDDIN, M. F. Effectiveness of low-concentration acid and solar drying as pretreatment features for producing pozzolanic sugarcane bagasse ash. **Journal of Cleaner Production**, v. 112, p. 953 – 962, 2016.

FIDJESTOL, P.; LEWIS, R. **Microsilica as an addition**. In: Hewlett, P. C. (ed), *Lea's chemistry of cement and concrete*, p. 679-712, New York: J. Wiley, 1998.

FREITAS, E. S. **Caracterização da cinza do bagaço da cana-de-açúcar do município de Campos dos Goytacazes para uso na construção civil**. 2005. 97 f. Dissertação Mestrado. Universidade Estadual Do Norte Fluminense Darcy Ribeiro, Campos Dos Goytacazes, RJ, 2005.

FREITAS, E.G.A.; RODRIGUES, E.H.V.; ARAUJO, R.C.L; FAY, I. **Efeito da adição de cinza de bagaço de cana na resistência à compressão de argamassa normal**. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA AGRÍCOLA, v.4, p.219-221, 1998.

FRÍAS, M.; VILLAR, E.; SAVASTANO, H. Brazilian Sugar Cane Bagasse Ashes from the Cogeneration Industry as Active Pozzolans for Cement Manufacture. **Cement and Concrete Composites**, v. 33, n. 4, p. 490–496, 2011.

FRÍAS, M.; VILLAR-COCINÃ, E.; VALENCIA-MORALES, E. Characterisation of sugar cane straw waste as pozzolanic material for construction: Calcining temperature and kinetic parameters. **Waste Management**, v. 27, p.533-538, 2007.

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

GÓES, P. B. DE B. **Análise da pozolanicidade por meio da difração de raios-X em pastas de cimento Portland e com Substituição por cinza do bagaço de cana-de-açúcar**. 2016. 91 f. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal de Pernambuco, Caruaru, PE, 2016.

GRUYAERT, E.; HEEDE, P. V.; BELIE, N. Carbonation of slag concrete: Effect of the cement replacement level and curing on the carbonation coefficient – Effect of carbonation on the pore structure. **Cement and Concrete Composites**, v. 35, p. 39 – 48, 2013.

HEMERLY, F. X. **Cadeia produtiva da cana-de-açúcar: alternativas para aumento de sua eficiência**. 4ª Reunião Anual de Programação de Pesquisa do CCTA. Campos dos Goytacazes, 44p, 2009.

HOPPE, J. F. **Sistemas Cimento, Cinza Volante e Cal hidratada: mecanismo de hidratação, microestrutura e carbonatação do concreto**. 2008. 318 f. Tese de Doutorado. Universidade de São Paulo, SP, 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.

HOUST, W. F.; WITTMANN, F. H. Depth profiles of carbonates formed during natural carbonation. **Cement and Concrete Research**, v. 32, p. 1923–1930, 2002.

HYVERT, N.; SELIER, A.; DUPRAT, F.; ROUGEAU, P.; FRANCISCO, P. Dependency of C–S–H carbonation rate on CO₂ pressure to explain transition from accelerated tests to natural carbonation. **Cement and Concrete Research**, v. 40, p. 1582–1589, 2010.

JOSHAGHANI, A.; MOEINI, M. A. Evaluating the effects of sugar cane bagasse ash (SCBA) and nanosilica on the mechanical and durability properties of mortar. **Construction and Building Materials**, v. 152, p. 818 – 831, 2017.

KAZMI, S. M. S.; ABBAS, S.; MUNIR, M. J.; KHITAB, A. Exploratory study on the effect of waste rice husk and sugarcane bagasse ashes in burnt clay bricks, **Journal of Building Engineering**, v. 7, p. 372–378, 2016.

KULAKOWSKI, M. P.; PEREIRA, F. M.; DAL MOLIN, D. C. C. Carbonation-induced reinforcement corrosion in silica fume concrete. **Construction and Building Materials**, v. 23, p. 1189–1195, 2009.

KULAKOWSKI, M.P. **Contribuição ao Estudo da Carbonatação em Concretos e Argamassas compostos com Adição de Sílica Ativa**. 2002. 199 f. Tese de Doutorado. Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, RS, 2002.

LI, X.; BERTOS, M. F.; HILLS, C. D.; CAREY, P. J.; SIMON, S. Accelerated carbonation of municipal solid waste incineration fly ashes. **Waste Management**, v.27, p. 1200–1206, 2007.

LIMA, S.A.; SALES, A.; ALMEIDA, F.C.R.; MORRETTI, J.P.; PORTELLA, K.F. Concretos com cinza do bagaço da cana-de-açúcar: avaliação da durabilidade por meio de ensaios de carbonatação e abrasão. **Ambiente Construído**, v.11, n2, p. 201-212, 2011.

LÓPEZ, R. Pozzolanic Properties of Residues of Sugar Industries (second part). **Materiales de Construcción**, v. 51, n. 261, p. 67-72, 2001.

LUXÁN, M.P.; MADRUGA, F.; SAAVEDRA, J. Rapid evaluation of pozzolanic activity of natural products by conductivity measurement. **Cement and Concrete Research**, v.19, p. 63- 68, 1989.

MACEDO, P. C. **Avaliação do desempenho de argamassas com adição de cinza do bagaço de cana-de-açúcar**. 2009. 118 f. Dissertação de Mestrado. Universidade Estadual Paulista, Ilha Solteira, SP, 2009.

MANSANEIRA, E. C. **Verificação da potencialidade do uso da cinza do bagaço da cana-de-açúcar em cimento Portland**. 2010. 116 f. Dissertação de Mestrado. Universidade Estadual de Londrina, Londrina, PR, 2010.

MARTINS, C.H.; ALTOÉ, S.P.S. Avaliação da utilização da cinza de bagaço de cana-de-açúcar na confecção de blocos de concreto para pavimentação. **Agronegócio e meio ambiente**, v. 6 n. 3, p. 39 – 54, 2015.

MARTIRENA HERNÁNDEZ, J. F.; BETANCOURT RODRÍGUEZ S.; MIDDENDORF, B.; RUBIO, A.; MARTÍNEZ FERNÁNDEZ, L.; MACHADO LÓPES, I; GONZÁLES LÓPEZ, R. Pozzolanic properties of Residues of Sugar Industries (first part). **Materiales de Construcción**, v. 50, n. 260, p. 71-78, 2000.

MARTIRENA HERNÁNDEZ, J. F.; BETANCOURT RODRÍGUEZ S.; MIDDENDORF, B.; RUBIO, A.; MARTÍNEZ FERNÁNDEZ, L.; MACHADO LÓPEZ, I; GONZÁLES

MARTIRENA HERNÁNDEZ, J.F.M.; MIDDEENDORF, B.; GEHRKE, M.; BUDELMANN, H. Use of the Wastes of the Sugar Industry as Pozzolana in Line-Pozzolana Binders: Study of the Reaction. **Cement and Concrete Research**, v. 28, n. 11, p. 1525–1536, 1998.

MASSAZZA, F. Pozzolana and pozzolanic cements. **Chemistry of cement and concrete**, 4 ed. New York: J. Wiley, p. 471-631, 1998.

MORAES, J. C. B. **Utilização da cinza de folha de cana-de-açúcar como material pozolânico em matrizes cimentantes**. 2015. 74 f. Dissertação de Mestrado. Universidade Estadual Paulista, Ilha Solteira, SP, 2015.

MORALES, E. V.; COCIÑA, E. V.; FRÍAS, M., SANTOS, S.F.; SAVASTANO Jr, H. Effects of Calcining Conditions on the Microstructure of Sugar Cane Waste Ashes (SCWA): Influence in the Pozzolanic Activation. **Cement and Concrete Composites**, v. 31, n. 1, p. 22–28, 2009.

NEVILLE, A. M. **Propriedades do concreto**. Tradução: Salvador E. Giammusso. 2. ed. rev. e atual. São Paulo: Pini, 1997.

OLIVEIRA, J. F. de. **Obtenção de sílicas mesoporosas altamente ordenadas a partir das cinzas da casca de arroz e do bagaço da cana-de-açúcar**. 2014. 156 f. Dissertação de Mestrado. Universidade de São Paulo, São Paulo, SP, 2014.

OLIVEIRA, M. P.; BARBOSA, N. P. Potencialidades de um caulim calcinado como material de substituição parcial do cimento Portland em argamassas. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**. vol.10, n.2, p. 490 – 496, 2006.

OSINUBI, K. J.; BAFYAU, V., EBEREMU, A. O. **Bagasse Ash Stabilization of Lateritic Soil**. In: E. K. Yanful (ed), *Appropriate Technologies for Environmental Protection in the Developing World*. Canada: Springer Science, p. 271-280, 2009.

PÁDUA, P. G. L. DE. **Desempenho de compósitos cimentícios fabricados com cinza de bagaço de cana-de-açúcar in natura e beneficiadas**. 2012. 209 f. Tese de Doutorado. Universidade Federal de Minas Gerais, MG, 2012.

PAIVA, O. A. **Durabilidade de concretos contendo cinza do bagaço da cana-de-açúcar**. 2016. 309 f. Tese de Doutorado. Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, RJ, 2016.

PAPADAKIS, V. G. Effect of suplementar cementing materials on concrete resistance against carbonation and chloride ingress. **Cement and Concrete Research**, v. 30, p. 291–299, 2000.

PAPADAKIS, V.G.; FARDIS, M.N.; VAYENAS, G.G.; Hydration and Carbonation of Pozolanic Cements. **ACI Materials Journal**, v. 89, n. 2, p. 119 – 130, 1992.

PAPADAKIS, V.G.; VAYENAS, G.G.; FARDIS, M.N.; Fundamental modeling and experimental investigation of concrete carbonation. **ACI Materials Journal**, v. 88, n. 4, p. 363 – 373, 1991.

PARIS, J. M.; ROESSLER, J. G.; FERRARO, C. C.; DEFORD, H. D; TOWNSEND, T. G. A review of waste products utilized as supplements to Portland cement in concrete. **Journal of Cleaner Production**, v. 121, p. 1 - 18, 2016.

PAULA, M. O. **Potencial da cinza do bagaço da cana-de-açúcar como material de substituição parcial de cimento Portland**. 2006. 77 f. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG, 2006

PAULETTI, C. **Estimativa da carbonatação natural de materiais cimentícios a partir de ensaios acelerados e de modelos de predição**. 2009. 238 f. Tese de Doutorado. Universidade do Rio Grande do Sul e Institut National des Sciences Appliqués de Toulouse, 2009.

PAULETTI, C; POSSAN, E; DDA MOLIN, D. C. C. Carbonatação acelerada: estado da arte das pesquisas no Brasil. **Ambiente Construído**, v. 7, n. 4, p. 7-20, 2007.

PAYÁ, J.; MONZO, J.; BORRACHERO, M. V.; DÍAS PINZÓN, L.; ORDÓNEZ, L.M. Sugar-Cane Bagasse Ash (SCBA): Studies on Its roperties for Reusing in Concrete roduction. **Journal of Chemical Technology & Biotechnology**, v. 77, n. 3, p. 321-325, 2002.

PELLEGRINI, L. F. **Análise e otimização termo-econômico-ambiental aplicada à produção combinada de açúcar, álcool e eletricidade**. 2009. 349 f. Tese de Doutorado. Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, SP, 2009.

PEREIRA, A. M. **Análise da viabilidade da utilização da cinza do bagaço da cana-de-açúcar como aglomerante para a produção de matrizes cimentantes**. 2014. 207 f. Dissertação de Mestrado. Universidade Estadual Paulista, Ilha Solteira, SP, 2014.

POGGIALI, F. S. J. **Desempenho de microconcretos fabricados com cimento Portland com adições de cinza de bagaço de cana-de-açúcar**. 2010. 150 f. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, MG, 2010.

RAMÍRES, R.A.; GARCÍA, P. M.; REYES, J. M.; JUÁREZ, D. C. A.; PONCE, Y. G. The use of sugarcane bagasse ash and lime to improve the durability and mechanical properties of compacted soil blocks. **Construction and Building Materials**. v. 34, p. 296 – 305, 2012.

RERKPIBOON, A.; TANGCHIRAPAT, W.; JATURAPITAKKU, C. Strength, chloride resistance, and expansion of concretes containing ground bagasse ash. **Construction and Building Materials**, v. 101, p. 983–989, 2015.

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

RILEM TC 116 – PCD: PERMEABILITY OF CONCRETE AS A CRITERION OF ITS DURABILITY. **Materials and Structures**, v. 32, p 174 – 179, 1999.

RIPOLI, T. C. C.; RIPOLI, M. L. C. Biomassa de cana-de-açúcar: colheita, energia e ambiente. Piracicaba: Barros & Marques Editoração Eletrônica, 302 f. 2004.

RUKZON, S.; CHINDAPRASIRT, P. Utilization of bagasse ash in high-strength concrete. **Material and Design**, v. 34, p. 45 – 50, 2012.

SAMPAIO, Z. L. M. **Análise do comportamento mecânico de concretos produzidos com incorporação de cinza do bagaço da cana-de-açúcar de variedades SP911049, RB92579 e SP816949**. 2013. 150 f. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, RN, 2013.

SANTOS, F. A DOS. **Análise da aplicação da biomassa da cana como fonte de energia elétrica: usina de açúcar, etanol e bioeletricidade**. 2012. 127 f. Dissertação de Mestrado. Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, SP, 2012.

SANTOS, T. A. **Avaliação do potencial calorífico do bagaço de cana-de-açúcar e da atividade pozolânica das cinzas geradas**. 2017. 167 f. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal da Bahia, Salvador, BA, 2017.

SARAIVA, S. L. C. **Estudo das reações álcali-agregado e das propriedades mecânicas de compósitos cimentício com cinza de bagaço de cana-de-açúcar**. 2017. 186 f. Tese de Doutorado. Universidade Federal de Ouro Preto, MG, 2017.

SILVA, J. F. e. **Propriedades físicas e mecânicas de argamassa reforçada com fibras do bagaço de cana-de-açúcar (FBC)**. 2010. 144 f. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal de Goiás, Goiânia, GO, 2010.

SILVA, S. R. da. **Contribuição ao estudo dos compostos com agregados graúdos de construção e demolição e cinza volante, em diferentes teores de substituição**. 2017. 73 f. Dissertação de mestrado. Universidade Católica do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2017.

SILVEIRA, D. A. **Influência da substituição parcial do cimento Portland pela cinza do bagaço de cana-de-açúcar (CBC) residual no concreto**. Dissertação de Mestrado. 2010. 110 f. Universidade Federal de Goiás, Goiânia, GO, 2010.

SIM, J.; PARK, C. Compressive strength and resistance to chloride ion penetration and carbonation of recycled aggregate concrete with varying amount of fly ash and fine recycled aggregate. **Waste Management**, v. 31, p. 2352–2360, 2011.

SINGH, N. B.; SINGH, V. D.; RAI, S. Hydration of Bagasse Ash-Blended Portland Cement. **Cement and Concrete Research**, v. 30, n. 09. p. 1485-1488, 2000.

SISOMPHON, K.; FRANKE, L. Carbonation rates of concretes containing high volume of pozzolanic materials. **Cement and Concrete Research**, v. 37, p. 1647 – 1653, 2007.

- SOARES, M. M. N. S. **Influência das condições de queima nas características físico-químicas das cinzas do bagaço de cana-de-açúcar**. 2010. 117 f. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, MG, 2010.
- SOARES, M. M. N. S.; GARCIA, D. C. S.; FIGUEIREDO, R.B.; AGUILAR, M. T. P.; CETLIN, P.R. Comparing the pozzolanic behavior of sugar cane bagasse ash to amorphous and crystalline SiO₂. **Cement and Concrete Composites**, v. 71, p. 20 – 25, 2016.
- SOMNA, R.; JATURAPITAKKUL, C.; AMDE, A. M. Effect of ground fly ash and ground bagasse ash on the durability of recycled aggregate concrete. **Cement and Concrete Composites**, v. 34, p. 848–854, 2012.
- SOSA-ARNÃO, J. H. **Caldeiras aquatubulares de bagaço – estudo do sistema de recuperação de energia**. 2007. 257 f. Tese de Doutorado. Universidade Estadual de Campinas, SP, 2007.
- SOUSA, L. R. L. de. **Viabilidade do uso de cinzas de bagaço de cana-de-açúcar (CBC) residuais do estado de Goiás como adição mineral ao cimento Portland**. 2009. 121 f. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal de Goiás, Goiânia, GO, 2009.
- SOUTO, J. M. F. **Avaliação do Desempenho da Cinza do Bagaço da Cana-de-açúcar na Produção de Concretos**. 2010. 121 f. Dissertação de Mestrado. Universidade Estadual de Maringá, PR, 2010.
- SOUZA, L. M. S., 2011. Estudo de Hidratação e Nanoindentação de Pastas de Cinza da Casca de Arroz e Cinza do Bagaço de Cana-de-Açúcar com Hidróxido de Cálcio. Dissertação de Mestrado. 2011. 136 f. Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, RJ, 2011.
- SUA-IAM, G.; MAKUL, N. Use of increasing amounts of bagasse ash waste to produce self-compacting concrete by adding limestone powder waste. **Journal of Cleaner Production**, v. 57, p. 308 – 319, 2013.
- TAYLOR, H. F. W., 1997, **Cement chemistry**, 2 ed. London: Thomas Telford, 459 p.
- THIERY, M. **Modélisation de la carbonation atmosphérique des bétons – Prise en compte de effets cinétiques et de l'état hydrique**. 2005. Tese de Doutorado, École Nationale des Ponts et Chaussées, Paris, 2005.
- THOMAS, C.; SETIÉN, J.; POLANCO, A.; ALAEJOS, P.; JUAN, M. S. DE. Durability of recycled aggregate concrete. **Construction and Building Materials**, Santander, v. 40, p. 1054–1065, 2013.
- UDOP – União dos produtores de bioenergia. Disponível em: < <http://www.udop.com.br/index.php?item=noticias&cod=1138389> >. Acesso em: 28 de dezembro de 2017.

VASCONCELOS, M. C. de A. **Avaliação da atividade pozolânica da cinza do bagaço de cana-de-açúcar utilizando métodos físicos**. 2013. 134 f. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal de Pernambuco, Recife, PE, 2013.

WERLE, A. P. **Determinação de propriedades de concretos com agregados reciclados de concreto, com ênfase na carbonatação**. 2010. 162 f. Dissertação de Mestrado. Universidade do Vale do Rio dos Sinos – UNISINOS, São Leopoldo, RS, 2010.

YOUNSI, A.; TURCRY, P.; AÏT-MOKHTAR, A.; STAQUET, S. Accelerated carbonation of concrete with high content of mineral additions: Effect of interactions between hydration and drying. **Cement and Concrete Research**, v. 43, p. 25–33, 2013.

ZARDO, A. M.; BEZERRA, E. M.; MARTELLO, L. S.; SAVASTANO JÚNIOR, H. **Utilização da cinza do bagaço de cana-de-açúcar como “filler” em compostos de fibrocimento**. In: I Conferência Latino-Americana de Construção Sustentável X Encontro Nacional de Tecnologia do Ambiente Construído. **Entac**. São Paulo, 2004.

WBCSD - World Business Council For Sustainable Development. Disponível em: <<https://www.wbcsd.org/Sector-Projects/Cement-Sustainability-initiative/News/Cement-technology-roadmap-shows-how-the-path-to-achieve-CO2-reductions-up-to-24-by-2050>>. Acesso em: 05 de agosto de 2019.

APÊNDICE A - GRANULOMETRIA DA AREIA, CIMENTO E CINZA DO BAGAÇO DA CANA-DE-AÇÚCAR

Areia			Cimento			Cinza do bagaço cana-de-açúcar		
Size(um)	%Chan	% Pass	Size(um)	%Chan	% Pass	Size(um)	%Chan	% Pass
2000,00	0,00	100,00	2000,00	0,00	100,00	2000,00	0,00	100,00
1674,00	0,00	100,00	1674,00	0,00	100,00	1674,00	0,00	100,00
1408,00	0,00	100,00	1408,00	0,00	100,00	1408,00	0,00	100,00
1184,00	0,00	100,00	1184,00	0,00	100,00	1184,00	0,00	100,00
995,50	0,00	100,00	995,50	0,00	100,00	995,50	0,00	100,00
837,10	0,00	100,00	837,10	0,00	100,00	837,10	0,00	100,00
703,90	0,00	100,00	703,90	0,00	100,00	703,90	0,00	100,00
591,90	0,00	100,00	591,90	0,00	100,00	591,90	0,00	100,00
497,80	0,36	100,00	497,80	0,00	100,00	497,80	0,00	100,00
418,60	0,67	99,64	418,60	0,00	100,00	418,60	0,00	100,00
352,00	1,28	98,97	352,00	0,00	100,00	352,00	0,00	100,00
296,00	2,38	97,69	296,00	0,00	100,00	296,00	0,00	100,00
248,90	3,80	95,31	248,90	0,00	100,00	248,90	0,00	100,00
209,30	5,14	91,51	209,30	0,00	100,00	209,30	0,00	100,00
176,00	6,04	86,37	176,00	0,00	100,00	176,00	0,00	100,00
148,00	6,52	80,33	148,00	0,00	100,00	148,00	0,00	100,00
124,40	6,75	73,81	124,40	0,00	100,00	124,40	0,00	100,00
104,60	7,02	67,06	104,60	0,00	100,00	104,60	0,00	100,00
87,99	7,50	60,04	87,99	0,00	100,00	87,99	0,00	100,00
73,99	8,16	52,54	73,99	0,00	100,00	73,99	0,00	100,00
62,22	8,44	44,38	62,22	0,49	100,00	62,22	0,00	100,00
52,32	8,15	35,94	52,32	0,85	99,51	52,32	0,00	100,00
44,00	6,86	27,79	44,00	1,52	98,66	44,00	0,00	100,00
37,00	5,30	20,93	37,00	2,75	97,14	37,00	0,00	100,00
31,11	4,04	15,63	31,11	5,00	94,39	31,11	0,00	100,00
26,16	3,17	11,59	26,16	8,75	89,39	26,16	0,00	100,00
22,00	2,52	8,42	22,00	13,61	80,64	22,00	0,99	100,00
18,50	1,95	5,90	18,50	17,16	67,03	18,50	3,01	99,01
15,55	1,43	3,95	15,55	16,83	49,87	15,55	6,28	96,00
13,08	0,99	2,52	13,08	12,93	33,04	13,08	8,82	89,72

11,00	0,69	1,53	11,00	8,48	20,11	11,00	9,21	80,90
9,25	0,48	0,84	9,25	5,18	11,63	9,25	8,54	71,69
7,78	0,36	0,36	7,78	3,06	6,45	7,78	8,14	63,15
6,54	0,00	0,00	6,54	1,75	3,39	6,54	8,43	55,01
5,50	0,00	0,00	5,50	0,96	1,64	5,50	9,02	46,58
4,62	0,00	0,00	4,62	0,53	0,68	4,62	9,21	37,56
3,89	0,00	0,00	3,89	0,15	0,15	3,89	8,73	28,35
3,27	0,00	0,00	3,27	0,00	0,00	3,27	7,38	19,62
2,75	0,00	0,00	2,75	0,00	0,00	2,75	5,50	12,24
2,31	0,00	0,00	2,31	0,00	0,00	2,31	3,54	6,74
1,94	0,00	0,00	1,94	0,00	0,00	1,94	1,92	3,20
1,64	0,00	0,00	1,64	0,00	0,00	1,64	0,89	1,28
1,38	0,00	0,00	1,38	0,00	0,00	1,38	0,39	0,39
1,16	0,00	0,00	1,16	0,00	0,00	1,16	0,00	0,00
0,97	0,00	0,00	0,97	0,00	0,00	0,97	0,00	0,00
0,82	0,00	0,00	0,82	0,00	0,00	0,82	0,00	0,00
0,69	0,00	0,00	0,69	0,00	0,00	0,69	0,00	0,00
0,58	0,00	0,00	0,58	0,00	0,00	0,58	0,00	0,00
0,49	0,00	0,00	0,49	0,00	0,00	0,49	0,00	0,00
0,41	0,00	0,00	0,41	0,00	0,00	0,41	0,00	0,00
0,34	0,00	0,00	0,34	0,00	0,00	0,34	0,00	0,00
0,29	0,00	0,00	0,29	0,00	0,00	0,29	0,00	0,00
0,24	0,00	0,00	0,24	0,00	0,00	0,24	0,00	0,00
0,20	0,00	0,00	0,20	0,00	0,00	0,20	0,00	0,00
0,17	0,00	0,00	0,17	0,00	0,00	0,17	0,00	0,00
0,15	0,00	0,00	0,15	0,00	0,00	0,15	0,00	0,00
0,12	0,00	0,00	0,12	0,00	0,00	0,12	0,00	0,00
0,10	0,00	0,00	0,10	0,00	0,00	0,10	0,00	0,00
0,09	0,00	0,00	0,09	0,00	0,00	0,09	0,00	0,00
0,07	0,00	0,00	0,07	0,00	0,00	0,07	0,00	0,00
0,06	0,00	0,00	0,06	0,00	0,00	0,06	0,00	0,00
0,05	0,00	0,00	0,05	0,00	0,00	0,05	0,00	0,00
0,04	0,00	0,00	0,04	0,00	0,00	0,04	0,00	0,00
0,04	0,00	0,00	0,04	0,00	0,00	0,04	0,00	0,00
0,03	0,00	0,00	0,03	0,00	0,00	0,03	0,00	0,00
0,03	0,00	0,00	0,03	0,00	0,00	0,03	0,00	0,00

APÊNDICE B - ENSAIO GRANULOMÉTRICO AMOSTRA 1 AREIA

Amostra 1 - Areia		
Abertura da Peneira (mm)	Massa Retira (%)	Massa Retira Acum. (%)
4,8	1	1
2,4	4	5
1,2	11	16
0,6	21	37
0,3	43	80
0,15	18	98
<0,15	2,0	100,0
Dimensão máxima característica		2,4
Módulo de finura		2,3

Amostra 1 - Areia		
Abertura da Peneira (mm)	Massa Retira (%)	Massa Retira Acum. (%)
4,8	1	1
2,4	3	4
1,2	10	14
0,6	21	35
0,3	45	80
0,15	18	98
<0,15	2,1	100,0
Dimensão máxima característica		2,4
Módulo de finura		2,3

Amostra - Média da areia		
Abertura da Peneira (mm)	Massa Retira (%)	Massa Retira Acum. (%)
4,8	1	1
2,4	4	5
1,2	10	15
0,6	21	36
0,3	44	80
0,15	18	98,0
<0,15	2,0	100,0
Dimensão máxima característica		2,4
Módulo de finura		2,3

APÊNDICE C – ÍNDICE DE ATIVIDADE POZOLÂNICA COM CIMENTO

Amostra A - CP's Referência						
CP	Carga (KgF)	Diâmetro (mm)	Raio	Área	Newton	Tensão (MPa)
1	7354	49,81	24,91	1948,60	72118,10	37,01
2	5787	49,60	24,80	1932,21	56751,08	29,37
3	8597	50,37	25,19	1992,66	84307,77	42,31
4	7132	50,08	25,04	1969,78	69941,03	35,51
					Média	36,05

Amostra B - CP's com 25% Substituição						
CP	Carga (KgF)	Diâmetro (mm)	Raio	Área	Newton	Tensão (MPa)
1	7337	50,00	25,00	1963,50	71951,39	36,64
2	6808	50,50	25,25	2002,96	66763,67	33,33
3	6154	50,42	25,21	1996,62	60350,12	30,23
4	7145	49,71	24,86	1940,78	70068,51	36,10
					Média	34,08

IAP com cimento		
Média amostra A (MPa)	Média amostra B (MPa)	Diferença (Amostra B/ Amostra A) x 100 (%)
36,05	34,08	94,53

APÊNDICE D - RESISTÊNCIA MECÂNICA

- COMPRESSÃO PARA 7 DIAS

	a/agl	Dimensões		Área (mm ²)	Área cm ²	Carga de ruptura (kgf)		Carga de ruptura (MPa)		Média (MPa)	Devio Padrão
		B	L								
REF	0,4	61,04	59,85	3653,24	3,65	16605	14354	44,544	38,505	39,28	3,95
		61,41	60,47	3713,46	3,71	14811	13261	39,087	34,996		
REF	0,5	61,57	60,08	3699,13	3,70	9464	8661	25,073	22,945	24,28	1,07
		61,13	60,08	3672,69	3,67	9443	8952	25,197	23,887		
REF	0,6	61	60,53	3692,33	3,69	6842	8264	18,160	21,934	20,63	2,57
		59,95	61,01	3657,55	3,66	8811	7030	23,608	18,836		
5% CBC	0,4	60,06	60,55	3636,63	3,64	12454	13022	33,561	35,092	31,51	4,53
		60,98	60,1	3664,9	3,66	12150	9315	32,489	24,908		
5% CBC	0,5	61,25	60,63	3713,59	3,71	11681	13295	30,826	35,085	29,29	4,57
		61,23	60,09	3679,31	3,68	9648	9596	25,698	25,559		
5% CBC	0,6	61,11	60,58	3702,04	3,70	9468	12325	25,064	32,627	25,28	5,28
		60,13	60,6	3643,88	3,64	7546	8597	20,295	23,121		
10% CBC	0,4	60,42	60,73	3669,31	3,67	10550,8	6340,98	28,179	16,936	25,09	5,58
		59,98	60,89	3652,18	3,65	9741,39	10849	26,139	29,111		

10% CBC	0,5	59,52	60,4	3595,01	3,60	14920,9	12410	-	-	-	-
		60,13	60,6	3643,88	3,64	14580,6	13933,4	-	-		
10% CBC	0,6	58,85	59,95	3528,06	3,53	9005,61	9685,22	25,015	26,903	25,27	1,70
		60,22	60,41	3637,89	3,64	9711,11	8536,6	26,160	22,996		
20% CBC	0,4	60,02	60,58	3636,01	3,64	8634,15	10467,5	23,271	28,213	30,75	6,34
		59,8	60,47	3616,11	3,62	12463,7	13929,8	33,778	37,751		
20% CBC	0,5	59,97	60,22	3611,39	3,61	9251,58	8953,21	25,105	24,296	26,83	2,56
		60,42	60,21	3637,89	3,64	10458,9	11039,8	28,175	29,740		
20% CBC	0,6	61,46	60,08	3692,52	3,69	7450,97	7922,94	19,775	21,028	17,63	3,37
		61,91	60,6	3751,75	3,75	5248,11	6131,5	13,709	16,016		
30% CBC	0,4	57,95	60,05	3479,9	3,48	9991,03	11106,5	28,136	31,278	29,03	3,18
		58,27	60,2	3507,85	3,51	11378,2	8919,37	31,788	24,918		
30% CBC	0,5	59,5	60,34	3590,23	3,59	8324,97	8444,65	22,724	23,051	23,26	3,38
		58,8	59,83	3518	3,52	9951,58	7009,07	27,722	19,525		
30% CBC	0,6	59,74	60,83	3633,98	3,63	5962,59	4866,77	16,080	13,125	16,30	2,32
		60,45	59,9	3620,96	3,62	6537,1	6762,69	17,692	18,303		

Nota: - Valor espúrio.

- COMPRESSÃO PARA 28 DIAS

	a/agl	Dimensões		Área (mm ²)	Área (cm ²)	Carga de ruptura (kgf)		Carga de ruptura (MPa)		Média (MPa)	Desvio padrão
		B	L								
REF	0,4	60,19	60,41	3636,08	3,64	13773	18847	37,12	50,80	42,68	8,07
		61,27	60,26	3692,13	3,69	18198	12996	48,30	34,50		
REF	0,5	63,98	60,84	3892,54	3,89	12620	13709	31,77	34,51	33,51	1,28
		61	60,16	3669,76	3,67	12483	12893	33,34	34,43		
REF	0,6	60,31	60,8	3666,85	3,67	9908	9306	26,48	24,87	24,30	1,75
		60,86	61,46	3740,46	3,74	8892	8606	23,30	22,55		
5% CBC	0,4	59,22	59,76	3538,99	3,54	15554	12364	43,07	34,24	38,65	6,65
		62,67	68,26	4277,85	4,28	10006	9981	-	-		
5% CBC	0,5	61,13	60,52	3699,59	3,70	14627	17066	38,75	45,21	35,05	10,87
		61,2	60,27	3688,52	3,69	7414	13756	19,70	36,55		
5% CBC	0,6	61,06	60,4	3688,02	3,69	14952	15772	-	-	29,11	4,19
		60,55	60,14	3641,48	3,64	9720	11920	26,16	32,08		
10% CBC	0,4	60,87	59,67	3632,11	3,63	14294	11980	38,57	32,32	37,92	4,09
		59,1	60,82	3594,46	3,59	14170	15464	38,63	42,16		
10% CBC	0,5	59,95	60,09	3602,40	3,60	8080	9793	-	-	31,69	1,21
		59,81	60,63	3626,28	3,63	12044	11411	32,55	30,84		

10% CBC	0,6	60,68	60,03	3642,62	3,64	9468	10557	25,47	28,40	26,94	2,07
		59,94	60,48	3625,17	3,63	8371	8828	-	-		
20% CBC	0,4	60,16	60,86	3661,34	3,66	15593	14004	41,74	37,48	36,59	7,71
		59,95	59,33	3556,83	3,56	15144	9225	41,73	25,42		
20% CBC	0,5	60,03	58,18	3492,55	3,49	12274	13491	34,44	37,86	32,76	5,92
		60,08	54,25	3259,34	3,26	8053	11485	24,21	34,53		
20% CBC	0,6	59,93	60,23	3609,58	3,61	9246	9532	25,10	25,88	24,79	1,39
		60	61,16	3669,60	3,67	8520	9515	22,75	25,41		
30% CBC	0,4	60,32	59,03	3560,69	3,56	10698	14004	29,44	38,54	30,83	5,24
		60,2	59,01	3552,40	3,55	9789	10271	27,00	28,33		
30% CBC	0,5	60,55	59,93	3628,76	3,63	14068	12787	37,99	34,53	30,98	6,70
		61,39	59,8	3671,12	3,67	10724	8533	28,63	22,78		
30% CBC	0,6	58,82	60,26	3544,49	3,54	9233	9634	25,53	26,64	25,14	1,41
		57,93	60,7	3516,35	3,52	9020	8341	25,14	23,25		

- COMPRESSÃO PARA 63 DIAS

	a/agl	Dimensões		Área (mm ²)	Área (cm ²)	Carga de ruptura (kgf)		Carga de ruptura (MPa)		Média (MPa)	Devio padrão
		B	L								
REF	0,4	61,15	60,15	3678,17	36,78	15836	10647	42,19	28,37	46,58	14,38
		60,3	60,45	3645,14	36,45	20564	22498	55,29	60,49		
REF	0,5	60,8	60,14	3656,51	36,57	14683	12684	39,35	-	38,16	1,69
		60,96	60,9	3712,46	37,12	14004	12667	36,97	-		
REF	0,6	59,8	60,15	3596,97	35,97	12402	12799	33,79	34,87	35,85	2,20
		59,82	60,35	3610,14	36,10	14333	13197	38,91	35,82		
5% CBC	0,4	61,21	57,08	3493,87	34,94	20269	19052	56,85	53,44	52,63	3,23
		61,1	60,18	3677,00	36,77	18706	18898	49,86	50,37		
5% CBC	0,5	60,35	59,93	3616,78	36,17	16810	18181	45,55	49,26	47,41	2,63
		60,6	60,45	3663,27	36,63	14465	13953	-	-		
5% CBC	0,6	60,28	60,22	3630,06	36,30	17352	14401	46,84	38,88	43,60	4,47
		59,6	60,73	3619,51	36,20	15042	17707	40,73	47,94		
10% CBC	0,4	60,72	59,88	3635,91	36,36	16131	20589	-	55,49	53,18	2,12
		60,02	59,97	3599,40	35,99	18855	19359	51,34	52,71		
10% CBC	0,5	60,06	59,21	3556,15	35,56	21909	20615	-	-	52,31	1,83
		60,24	60,07	3618,62	36,19	18838	19795	51,02	53,61		

10% CBC	0,6	59,72	60,3	3601,12	36,01	14350	14076	39,05	38,31	38,87	0,52
		60,12	60,71	3649,89	36,50	14709	14388	39,49	38,63		
20% CBC	0,4	60,01	60,19	3612,00	36,12	20218	17553	54,86	47,62	51,61	3,00
		60,21	60,54	3645,11	36,45	19475	19197	52,36	51,61		
20% CBC	0,5	60,45	60,03	3628,81	36,29	17886	16899	48,30	45,64	46,79	1,17
		60,18	60,4	3634,87	36,35	17460	17117	47,07	46,15		
20% CBC	0,6	60,33	59,68	3600,49	36,00	15255	13684	41,52	37,25	38,69	1,97
		60,86	60,06	3655,25	36,55	13978	14363	37,48	38,51		
30% CBC	0,4	58,66	58,85	3452,14	34,52	15144	13893	42,99	39,44	40,93	1,87
		58,62	59,15	3467,37	34,67	13890	14875	39,26	42,04		
30% CBC	0,5	59,5	61,07	3633,67	36,34	15388	12176	41,50	32,84	34,84	4,73
		59,97	59,13	3546,03	35,46	12483	11044	34,50	30,52		
30% CBC	0,6	60,8	59,55	3620,64	36,21	10762	12582	29,13	34,06	31,28	2,35
		61,01	60,25	3675,85	36,76	11083	12146	29,55	32,38		

APÊNDICE E - SAZONAMENTO

	100% de umidade	40% de umidade	Fator	A	B	C	D	E	F	G	H
REF 0,4	109,40	43,76	0,9696	1349,93	1356,33	1380,38	1344,99	1282,06	1356,43	1278,27	1295,92
REF 0,5	130,00	52,00	0,9631	1322,47	1344,04	1308,12	1324,30	1323,91	1319,87	1315,34	1305,32
REF 0,6	154,60	61,84	0,9564	1305,24	1299,41	1339,01	1336,14	1319,97	1311,84	1329,25	1307,54
5% CBC	113,70	45,48	0,9687	1352,89	1369,64	1368,87	1371,29	1378,56	1396,28	1391,34	1389,60
5% CBC	136,40	54,56	0,9627	1357,42	1338,13	1354,47	1402,90	1365,64	1389,61	1340,13	1357,56
5% CBC	153,10	61,24	0,9576	1330,75	1333,43	1325,00	1351,43	1328,45	1335,82	1342,24	1356,03
10% CBC	108,50	43,40	0,9697	1412,27	1381,34	1373,97	1372,22	1367,95	1420,03	1367,18	1378,33
10% CBC	127,20	50,88	0,9656	1403,18	1395,36	1428,48	1413,22	1414,77	1414,48	1416,60	1445,86
10% CBC	140,60	56,24	0,9609	1351,21	1356,30	1339,39	1378,02	1355,63	1391,57	1364,47	1382,82
20% CBC	109,20	43,68	0,9698	1401,29	1399,16	1437,08	1419,91	1373,56	1398,77	1393,34	1387,23
20% CBC	125,80	50,32	0,9648	1348,41	1351,88	1370,21	1351,30	1402,63	1347,16	1391,34	1330,18
20% CBC	142,50	57,00	0,9603	1358,59	1339,67	1340,73	1329,01	1341,02	1322,58	1352,83	1314,90
30% CBC	97,40	38,96	0,9721	1405,04	1410,29	1343,51	1386,86	1415,73	1412,04	1416,41	1396,29
30% CBC	117,90	47,16	0,9668	1418,02	1404,29	1407,86	1374,32	1388,43	1384,76	1356,53	1375,67
30% CBC	137,10	54,84	0,9605	1328,75	1342,87	1352,47	1334,99	1350,36	1331,15	1315,11	1351,51

APÊNDICE F - RESULTADOS DE CARBONATAÇÃO ACELERADA

- CARBONATAÇÃO 28 DIAS

	a/agl	Letra	Área (cm ²)	Área carbonatada (cm ²)	Espessura (cm)	Espessura (mm)	Média
REF	0,4	D	36,00	2,37	0,198	1,98	1,57
		E	36,00	1,83	0,153	1,53	
		F	36,00	1,45	0,121	1,21	
REF	0,5	D	36,00	2,49	0,208	2,08	2,04
		E	36,00	2,28	0,190	1,90	
		F	36,00	2,56	0,213	2,13	
REF	0,6	D	36,00	1,74	0,145	1,45	2,09
		E	36,00	2,82	0,235	2,35	
		F	36,00	2,97	0,248	2,48	
5% CBC	0,4	D	36,00	1,99	0,166	1,66	3,09
		E	36,00	1,95	0,162	1,62	
		F	36,00	1,69	0,141	1,41	
5% CBC	0,5	D	36,00	2,63	0,219	2,19	4,09
		E	36,00	2,06	0,172	1,72	
		F	36,00	3,11	0,259	2,59	
5% CBC	0,6	D	36,00	3,45	0,287	2,87	5,09
		E	36,00	3,28	0,273	2,73	
		F	36,00	3,45	0,287	2,87	
10% CBC	0,4	D	36,00	1,94	0,162	1,62	6,09
		E	36,00	1,92	0,160	1,60	
		F	36,00	2,10	0,175	1,75	
10% CBC	0,5	D	36,00	2,11	0,176	1,76	7,09
		E	36,00	2,33	0,194	1,94	
		F	36,00	2,63	0,219	2,19	
10%	0,6	D	36,00	2,97	0,248	2,48	8,09

CBC		E	36,00	3,28	0,274	2,74	
		F	36,00	3,39	0,282	2,82	
20% CBC	0,4	D	36,00	2,21	0,184	1,84	9,09
		E	36,00	2,51	0,209	2,09	
		F	36,00	2,28	0,190	1,90	
20% CBC	0,5	D	36,00	1,91	0,159	1,59	10,09
		G	36,00	2,23	0,186	1,86	
		H	36,00	2,27	0,189	1,89	
20% CBC	0,6	D	36,00	2,46	0,205	2,05	11,09
		E	36,00	2,83	0,236	2,36	
		F	36,00	2,55	0,213	2,13	
30% CBC	0,4	D	36,00	2,44	0,203	2,03	12,09
		E	36,00	1,95	0,163	1,63	
		F	36,00	2,02	0,169	1,69	
30% CBC	0,5	D	36,00	2,56	0,214	2,14	13,09
		E	36,00	2,85	0,238	2,38	
		F	36,00	3,44	0,287	2,87	
30% CBC	0,6	D	36,00	3,74	0,312	3,12	14,09
		E	36,00	4,27	0,356	3,56	
		F	36,00	4,14	0,345	3,45	

- CARBONATAÇÃO 63 DIAS

	a/agl	Letra	Área (cm ²)	Área carbonatada (cm ²)	Espessura (cm)	Espessura (mm)	Média
REF	0,4	D	36,00	2,38	0,198	1,98	1,81
		E	36,00	1,92	0,160	1,60	
		F	36,00	2,22	0,185	1,85	
REF	0,5	D	36,00	3,51	0,292	2,92	2,54
		E	36,00	3,17	0,264	2,64	
		F	36,00	2,46	0,205	2,05	
REF	0,6	D	36,00	3,53	0,294	2,94	2,09
		E	36,00	3,55	0,296	2,96	
		F	36,00	4,55	0,379	3,79	
5% CBC	0,4	D	36,00	3,20	0,267	2,67	3,09
		E	36,00	3,96	0,330	3,30	
		F	36,00	3,57	0,297	2,97	
5% CBC	0,5	D	36,00	4,00	0,333	3,33	4,09
		E	36,00	4,00	0,333	3,33	
		F	36,00	3,82	0,318	3,18	
5% CBC	0,6	D	36,00	4,54	0,378	3,78	5,09
		E	36,00	4,26	0,355	3,55	
		F	36,00	4,25	0,355	3,55	
10% CBC	0,4	D	36,00	3,79	0,316	3,16	6,09
		E	36,00	3,72	0,310	3,10	
		F	36,00	3,61	0,301	3,01	
10% CBC	0,5	D	36,00	3,09	0,258	2,58	7,09
		E	36,00	3,70	0,309	3,09	
		F	36,00	3,44	0,287	2,87	
10% CBC	0,6	D	36,00	4,31	0,359	3,59	8,09
		E	36,00	4,17	0,348	3,48	
		F	36,00	4,38	0,365	3,65	

20% CBC	0,4	D	36,00	3,20	0,267	2,67	9,09
		E	36,00	3,32	0,277	2,77	
		F	36,00	3,07	0,256	2,56	
20% CBC	0,5	D	36,00	3,30	0,275	2,75	10,09
		G	36,00	3,82	0,319	3,19	
		H	36,00	3,80	0,316	3,16	
20% CBC	0,6	D	36,00	3,28	0,273	2,73	11,09
		E	36,00	3,90	0,325	3,25	
		F	36,00	4,26	0,355	3,55	
30% CBC	0,4	D	36,00	3,93	0,327	3,27	12,09
		E	36,00	4,32	0,360	3,60	
		F	36,00	4,21	0,351	3,51	
30% CBC	0,5	D	36,00	3,93	0,327	3,27	13,09
		E	36,00	4,87	0,406	4,06	
		F	36,00	4,60	0,383	3,83	
30% CBC	0,6	D	36,00	5,04	0,420	4,20	14,09
		E	36,00	4,82	0,402	4,02	
		F	36,00	4,56	0,380	3,80	

- CARBONATAÇÃO 121 DIAS

	a/agl	Letra	Área (cm ²)	Área carbonatada (cm ²)	Espessura (cm)	Espessura (mm)	Média
REF	0,4	A	36,00	4,19	0,349	3,49	3,38
		B	36,00	3,97	0,331	3,31	
		C	36,00	4,00	0,333	3,33	
REF	0,5	A	36,00	4,08	0,340	3,40	3,66
		B	36,00	4,44	0,370	3,70	
		C	36,00	4,66	0,389	3,89	
REF	0,6	A	36,00	5,71	0,475	4,75	2,09
		B	36,00	5,04	0,420	4,20	
		C	36,00	4,83	0,402	4,02	
5% CBC	0,4	A	36,00	5,71	0,475	4,75	3,09
		B	36,00	5,04	0,420	4,20	
		C	36,00	4,83	0,402	4,02	
5% CBC	0,5	A	36,00	3,89	0,324	3,24	4,09
		B	36,00	3,58	0,298	2,98	
		C	36,00	4,40	0,367	3,67	
5% CBC	0,6	A	36,00	4,42	0,368	3,68	5,09
		B	36,00	5,19	0,433	4,33	
		C	36,00	4,19	0,349	3,49	
10% CBC	0,4	A	36,00	3,36	0,280	2,80	6,09
		B	36,00	4,21	0,351	3,51	
		C	36,00	4,36	0,363	3,63	
10% CBC	0,5	A	36,00	4,08	0,340	3,40	7,09
		B	36,00	4,23	0,353	3,53	
		C	36,00	3,60	0,300	3,00	
10% CBC	0,6	A	36,00	3,61	0,301	3,01	8,09
		B	36,00	4,96	0,414	4,14	
		C	36,00	5,58	0,465	4,65	

20% CBC	0,4	A	36,00	3,81	0,318	3,18	9,09
		B	36,00	4,11	0,342	3,42	
		C	36,00	4,72	0,393	3,93	
20% CBC	0,5	A	36,00	3,93	0,328	3,28	10,09
		B	36,00	4,26	0,355	3,55	
		C	36,00	3,97	0,331	3,31	
20% CBC	0,6	A	36,00	4,34	0,362	3,62	11,09
		B	36,00	4,74	0,395	3,95	
		C	36,00	4,80	0,400	4,00	
30% CBC	0,4	A	36,00	6,06	0,505	5,05	12,09
		B	36,00	6,53	0,544	5,44	
		C	36,00	5,16	0,430	4,30	
30% CBC	0,5	A	36,00	6,46	0,539	5,39	13,09
		B	36,00	6,25	0,521	5,21	
		C	36,00	5,57	0,464	4,64	
30% CBC	0,6	A	36,00	7,93	0,661	6,61	14,09
		B	36,00	7,98	0,665	6,65	
		C	36,00	6,71	0,560	5,60	

- CARBONATAÇÃO 149 DIAS

	a/agl	Letra	Área (cm ²)	Área carbonatada (cm ²)	Espessura (cm)	Espessura (mm)	Média
REF	0,4	D	36,00	2,38	0,198	1,98	1,81
		E	36,00	1,92	0,160	1,60	
		F	36,00	2,22	0,185	1,85	
REF	0,5	D	36,00	3,51	0,292	2,92	2,54
		E	36,00	3,17	0,264	2,64	
		F	36,00	2,46	0,205	2,05	
REF	0,6	D	36,00	3,53	0,294	2,94	2,09
		E	36,00	3,55	0,296	2,96	
		F	36,00	4,55	0,379	3,79	
5% CBC	0,4	D	36,00	3,20	0,267	2,67	3,09
		E	36,00	3,96	0,330	3,30	
		F	36,00	3,57	0,297	2,97	
5% CBC	0,5	D	36,00	4,00	0,333	3,33	4,09
		E	36,00	4,00	0,333	3,33	
		F	36,00	3,82	0,318	3,18	
5% CBC	0,6	D	36,00	4,54	0,378	3,78	5,09
		E	36,00	4,26	0,355	3,55	
		F	36,00	4,25	0,355	3,55	
10% CBC	0,4	D	36,00	3,79	0,316	3,16	6,09
		E	36,00	3,72	0,310	3,10	
		F	36,00	3,61	0,301	3,01	
10% CBC	0,5	D	36,00	3,09	0,258	2,58	7,09
		E	36,00	3,70	0,309	3,09	
		F	36,00	3,44	0,287	2,87	
10% CBC	0,6	D	36,00	4,31	0,359	3,59	8,09
		E	36,00	4,17	0,348	3,48	
		F	36,00	4,38	0,365	3,65	

20% CBC	0,4	D	36,00	3,20	0,267	2,67	9,09
		E	36,00	3,32	0,277	2,77	
		F	36,00	3,07	0,256	2,56	
20% CBC	0,5	D	36,00	3,30	0,275	2,75	10,09
		G	36,00	3,82	0,319	3,19	
		H	36,00	3,80	0,316	3,16	
20% CBC	0,6	D	36,00	3,28	0,273	2,73	11,09
		E	36,00	3,90	0,325	3,25	
		F	36,00	4,26	0,355	3,55	
30% CBC	0,4	D	36,00	3,93	0,327	3,27	12,09
		E	36,00	4,32	0,360	3,60	
		F	36,00	4,21	0,351	3,51	
30% CBC	0,5	D	36,00	3,93	0,327	3,27	13,09
		E	36,00	4,87	0,406	4,06	
		F	36,00	4,60	0,383	3,83	
30% CBC	0,6	D	36,00	5,04	0,420	4,20	14,09
		E	36,00	4,82	0,402	4,02	
		F	36,00	4,56	0,380	3,80	

ANEXO A - GRANULOMETRIA CINZA DO BAGAÇO DA CANA-DE-AÇÚCAR

LCVMat



10.6.1

Alexander Plesch
AP629 AM224 Cinza de Bagaço

06/26/2018 17:52
DB Rec: 16461

S3000/S3500
S5386

Summary

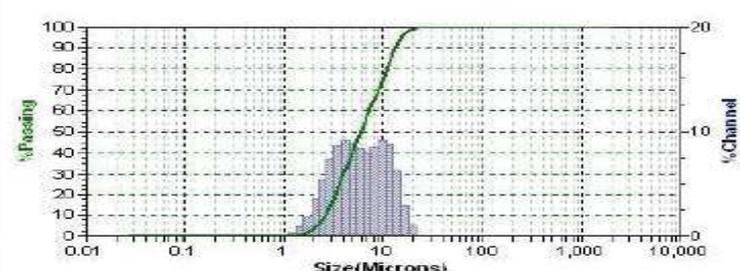
Data	Value
MV(um)	7.04
MN(um)	2.656
MA(um)	4.87
CS	1.233
SD	4.32
Mz	6.86
qt	4.11
skt	0.376
Kg	0.851

Size %

Size(um)	%Tile	%Tile	Size(um)
2.580	10.00		
3.30	20.00		
4.01	30.00		
4.84	40.00		
5.89	50.00		
7.28	60.00		
8.95	70.00		
10.82	80.00		
13.17	90.00		
15.04	95.00		

Peak Summary

Dia(nm)	Vol%	Width
10.33	45.0	6.47
3.83	55.0	2.98



Via úmida, prep Hex. Na, irregular, transparente, fluxo 10%, IR 1.81. Ult int 40W 1620s

Warnings: NONE

SOP Name: None(*)

Distribution	Volume	Run Time	20 Sec	Fluid	WATER		
Progression	Standard	Run#	2 of 2	Fluid Ref Index	1.993	Loading Factor	0.0272
Up Edge(um)	2500	Particle	CURRENT PARTICLE	Above Residual	0	Transmission	0.980
Low Edge(um)	0.0216	Transparency	Transparent	Below Residual	0	RMS Residual	0.888%
Residuals	Disabled	Part. Ref. Index	1.81			Flow	20 %
#Channels	68	Particle Shape	Irregular	Cell ID	2261	Uconite Power	40 Watts
Analysis Mode	S3000/S3500			Multi Run Delay	0 Min.	Uconite Time	80 Sec.
Filter	Enabled	DB Record	16472	Resolu Status	Original	Serial Number	86388
Analysis Gain	Default(2)	Database	C:\Program Files\Microtrac\FLEX 10.6.1\Databases\Analyses via úmida.MDB				

Size(um)	%Chan	% Pass	Size(um)	%Chan	% Pass
2000	0.00	100.00	5.50	9.02	46.58
1674	0.00	100.00	4.62	9.21	37.56
1408	0.00	100.00	3.89	8.73	28.35
1184	0.00	100.00	3.27	7.38	19.62
995.5	0.00	100.00	2.750	5.50	12.24
837.1	0.00	100.00	2.312	3.54	6.74
703.9	0.00	100.00	1.944	1.92	3.20
591.9	0.00	100.00	1.635	0.89	1.28
497.8	0.00	100.00	1.375	0.39	0.39
418.6	0.00	100.00	1.156	0.00	0.00
352.0	0.00	100.00	0.972	0.00	0.00
296.0	0.00	100.00	0.817	0.00	0.00
248.9	0.00	100.00	0.687	0.00	0.00
209.3	0.00	100.00	0.578	0.00	0.00
176.0	0.00	100.00	0.486	0.00	0.00
148.0	0.00	100.00	0.409	0.00	0.00
124.4	0.00	100.00	0.344	0.00	0.00
104.6	0.00	100.00	0.2890	0.00	0.00
87.99	0.00	100.00	0.2430	0.00	0.00
73.99	0.00	100.00	0.2040	0.00	0.00
62.22	0.00	100.00	0.1720	0.00	0.00
52.32	0.00	100.00	0.1450	0.00	0.00
44.00	0.00	100.00	0.1220	0.00	0.00
37.00	0.00	100.00	0.1020	0.00	0.00
31.11	0.00	100.00	0.0860	0.00	0.00
26.16	0.00	100.00	0.0720	0.00	0.00
22.00	0.99	100.00	0.0610	0.00	0.00
18.50	3.01	99.01	0.0510	0.00	0.00
15.55	6.28	96.00	0.0430	0.00	0.00
13.08	8.82	89.72	0.0360	0.00	0.00
11.00	9.21	80.90	0.0300	0.00	0.00
9.25	8.54	71.69	0.02550	0.00	0.00
7.78	8.14	63.15			
6.54	8.43	55.01			

ANEXO B - GRANULOMETRIA AREIA

LCVMat

Alexander Pletsch
AP664 AM232 - Areia

10/25/2018 14:46
DB Rec: 18403

S3000/S3500
S5386

Summary		Size %		%Tile		Peak Summary		
Data	Value	Size (um)	%Tile	%Tile	Size (um)	Dia (nm)	Vol%	Width
MV(um)	34.36			10.00	24.10	70.03	100.0	132.60
MN(um)	15.47			20.00	36.00			
MA(um)	49.91			30.00	46.20			
CS	1.20E			40.00	56.86			
01				50.00	70.03			
SD	66.28			60.00	87.91			
				70.00	112.8			
Mz	88.55			80.00	146.7			
ex	67.64			90.00	198.1			
Skt	0.477			95.00	244.9			
Kg	1.071							

Amostra direta, irregular, transparente, fluxo 25%, IR 1.6.

Warnings: NONE

SOP Name: None(*)

Distribution:	Volume	Run Time:	20 Sec	Fluid:	WATER		
Progression:	Standard	Run#:		Avg of 2	Fluid Ref Index:	1.335	
Up Edge(um):	2000	Particle:	CURRENT PARTICLE	Above Residual:	0	Loading Factor:	0.0670
Low Edge(um):	0.0215	Transparency:	Transparent	Below Residual:	0	RMS Residual:	0.688%
Residuals:	Disabled	Part. Ref. Index:	1.6			Flow:	26 %
#Channels:	99	Particle Shape:	Irregular	Cell ID:	2261	Usonic Power:	N/A
Analysis Mode:	S3000/S500			Multi Run Delay:	0 Min.	Usonic Time:	N/A
Filter:	Enabled	DB Record:	18403	Recalc Status:	Original	Serial Number:	56398
Analysis Gain:	Default(2)	Database:	C:\Program Files\Microtrac FLEX 10.6.1\Databases\Analisec via Umida.MDB				

Size(um)	%Chan	% Pass	Size(um)	%Chan	% Pass
2000	0.00	100.00	5.50	0.00	0.00
1674	0.00	100.00	4.62	0.00	0.00
1408	0.00	100.00	3.89	0.00	0.00
1184	0.00	100.00	3.27	0.00	0.00
995.5	0.00	100.00	2.750	0.00	0.00
837.1	0.00	100.00	2.312	0.00	0.00
703.9	0.00	100.00	1.944	0.00	0.00
591.9	0.00	100.00	1.635	0.00	0.00
497.8	0.36	100.00	1.375	0.00	0.00
418.6	0.67	99.64	1.156	0.00	0.00
352.0	1.28	98.97	0.972	0.00	0.00
296.0	2.38	97.69	0.817	0.00	0.00
248.9	3.80	95.31	0.687	0.00	0.00
209.3	5.14	91.51	0.578	0.00	0.00
176.0	6.04	86.37	0.486	0.00	0.00
148.0	6.52	80.33	0.409	0.00	0.00
124.4	6.75	73.81	0.344	0.00	0.00
104.6	7.02	67.06	0.2890	0.00	0.00
87.99	7.50	60.04	0.2430	0.00	0.00
73.99	8.16	52.54	0.2040	0.00	0.00
62.22	8.44	44.38	0.1720	0.00	0.00
52.32	8.15	35.94	0.1450	0.00	0.00
44.00	6.86	27.79	0.1220	0.00	0.00
37.00	5.30	20.93	0.1020	0.00	0.00
31.11	4.04	15.63	0.0860	0.00	0.00
26.16	3.17	11.59	0.0720	0.00	0.00
22.00	2.52	8.42	0.0610	0.00	0.00
18.50	1.95	5.90	0.0510	0.00	0.00
15.55	1.43	3.95	0.0430	0.00	0.00
13.08	0.99	2.52	0.0360	0.00	0.00
11.00	0.69	1.53	0.0300	0.00	0.00
9.25	0.48	0.84	0.02550	0.00	0.00
7.78	0.36	0.36			
6.54	0.00	0.00			

ANEXO C - GRANULOMETRIA CIMENTO

LCVMat

Alexander Pletsch
AP665 AM233 - Cimento

10/25/2018 15:33
DB Rec: 18427

S3000/S3500
S5386

Summary		Size %		%Tile	
Data	Value	Size (um)	%Tile	%Tile	Size (um)
MV (um)	17.04			10.00	8.84
MN (um)	9.04			20.00	10.98
MA (um)	13.98			30.00	12.62
CS:	4.29E-01			40.00	14.09
SD:	6.54			50.00	15.57
				60.00	17.19
Mz:	16.36			70.00	19.14
σ:	7.04			80.00	21.80
Ski:	0.2555			90.00	26.62
Kg:	1.198			95.00	32.10

Peak Summary		
Dia (nm)	Vol%	Width
15.57	100.0	13.08

SOP Name: None (*)

Distribution:	Volume	Run Time:	20 Sec	Fluid:	ALCOOL ISOPROPILICO
Progression:	Standard	Run#:	Avg of 2	Fluid Ref Index:	1.38
Up Edge (um):	2000	Particle:	CURRENT PARTICLE	Above Residual:	0
Low Edge (um):	0.0216	Transparency:	Transparent	Below Residual:	0
Residual:	Disabled	Part. Ref. Index:	1.98	Flow:	26 %
#Channels:	98	Particle Shape:	Irregular	Cell ID:	2251
Analysis Mode:	S3000/S3500	Multi Run Delay:	0 Min.	Usonic Power:	N/A
Filter:	Enabled	DB Record:	18427	Rezero Status:	Original
Analysis Gain:	Default(2)	Database:	C:\Program Files\Microtrac FLEX 10.8.1\Databases\Analises via Omida.MDB		

Size (um)	%Chan	% Pass	Size (um)	%Chan	% Pass
2000	0.00	100.00	5.50	0.96	1.64
1674	0.00	100.00	4.62	0.53	0.68
1408	0.00	100.00	3.89	0.15	0.15
1184	0.00	100.00	3.27	0.00	0.00
995.5	0.00	100.00	2.750	0.00	0.00
837.1	0.00	100.00	2.312	0.00	0.00
703.9	0.00	100.00	1.944	0.00	0.00
591.9	0.00	100.00	1.635	0.00	0.00
497.8	0.00	100.00	1.375	0.00	0.00
418.6	0.00	100.00	1.156	0.00	0.00
352.0	0.00	100.00	0.972	0.00	0.00
296.0	0.00	100.00	0.817	0.00	0.00
248.9	0.00	100.00	0.687	0.00	0.00
209.3	0.00	100.00	0.578	0.00	0.00
176.0	0.00	100.00	0.486	0.00	0.00
148.0	0.00	100.00	0.409	0.00	0.00
124.4	0.00	100.00	0.344	0.00	0.00
104.6	0.00	100.00	0.2890	0.00	0.00
87.99	0.00	100.00	0.2430	0.00	0.00
73.99	0.00	100.00	0.2040	0.00	0.00
62.22	0.49	100.00	0.1720	0.00	0.00
52.32	0.85	99.51	0.1450	0.00	0.00
44.00	1.52	98.66	0.1220	0.00	0.00
37.00	2.75	97.14	0.1020	0.00	0.00
31.11	5.00	94.39	0.0860	0.00	0.00
26.16	8.75	89.39	0.0720	0.00	0.00
22.00	13.61	80.64	0.0610	0.00	0.00
18.50	17.16	67.03	0.0510	0.00	0.00
15.55	16.83	49.87	0.0430	0.00	0.00
13.08	12.93	33.04	0.0360	0.00	0.00
11.00	8.48	20.11	0.0300	0.00	0.00
9.25	5.18	11.63	0.02550	0.00	0.00
7.78	3.06	6.45			
6.54	1.75	3.39			

Amostra prep Xilol, irregular, transparente, fluxo 25%, IR 1.98. Ult ext 100W 2min

Warnings: NONE