

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS**  
**ESCOLA DE ENGENHARIA**  
**PROGRAMA DE MESTRADO EM ENGENHARIA DE MATERIAIS E**  
**CONSTRUÇÃO CIVIL**

Wesley Silva de Oliveira

**USO DE CINZAS BRUTAS DE BAGAÇO DE CANA-DE-AÇÚCAR COMO**  
**MATERIAL SUBSTITUTIVO NO CONCRETO**

Belo Horizonte

2021

Wesley Silva de Olivei

ra

**USO DE CINZAS BRUTAS DE BAGAÇO DE CANA-DE-AÇÚCAR COMO  
MATERIAL SUBSTITUTIVO NO CONCRETO**

**Versão fin**

**al**

Dissertação apresentada à Escola de Engenharia da Universidade Federal de Minas Gerais como parte dos requisitos para obtenção do título de Mestre em Construção Civil. Área de concentração: Materiais de Construção Civil. Linha de pesquisa: Materiais Cimentícios.

Orientadora: Prof<sup>ª</sup> Dr<sup>ª</sup> Carmen Couto Ribeiro

Coorientadora: Prof<sup>ª</sup> Dr<sup>ª</sup> Marys Lene Braga Almeida

Belo Horizonte

2021

O48u

Oliveira, Wesley Silva de.

Uso de cinzas brutas de bagaço de cana-de-açúcar como material substitutivo no concreto [recurso eletrônico] / Wesley Silva de Oliveira. – 2021.

1 recurso online (x, 78 f. : il., color.) : pdf.

Orientadora: Carmen Couto Ribeiro.

Coorientadora: Marys Lene Braga Almeida.

Dissertação (mestrado) – Universidade Federal de Minas Gerais, Escola de Engenharia.

Bibliografia: f. 66-78.

Exigências do sistema: Adobe Acrobat Reader.

1. Construção civil - Teses. 2. Materiais de construção - Teses.
3. Cinza de bagaço de cana-de-açúcar - Teses. 4. Bagaço de cana - Teses. 5. Resíduos - Teses. 6. Concreto - Teses. 7. Cimento - Teses. I. Ribeiro, Carmen Couto. II. Almeida, Marys Lene Braga. III. Universidade Federal de Minas Gerais. Escola de Engenharia. IV. Título.

CDU: 691(043)



UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS

PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM MATERIAIS E CONSTRUÇÃO CIVIL

MESTRADO EM CONSTRUÇÃO CIVIL

WESLEY SILVA DE OLIVEIRA

**USO DE CINZAS BRUTAS DE BAGAÇO DE CANA-DE-AÇÚCAR COMO  
MATERIAL SUBSTITUTIVO NO CONCRETO**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Materiais e Construção Civil da Universidade Federal de Minas Gerais como requisito para a obtenção do título de Mestre em Construção Civil.

Belo Horizonte, 10 de dezembro de 2021

BANCA EXAMINADORA

Prof<sup>ª</sup> Dra. Maria Carmen Couto Ribeiro  
(Orientadora)  
UFMG

Prof<sup>ª</sup> Dra. Marys Lene Braga Almeida  
(Coorientadora)  
UFMG

Prof<sup>ª</sup> Dra. Júnia Nunes de Paula  
CEFET-MG

Prof<sup>ª</sup> Dra. Marcela Maira Nascimento de Souza Soares  
UFMG

Prof. Eduardo Chahud / Profa. Maria Teresa Paulino Aguiar Coordenação do Curso de  
Mestrado em Construção Civil

O aluno e os referidos membros participaram da defesa por meio de videoconferência.

*Dedico este trabalho à memória do meu irmão  
Welerson Silva de Oliveira  
e aos meus pais, Joaquina e Genuino.*

## **AGRADECIMENTOS**

Agradeço aos meus pais, Joaquina Silva de Oliveira e Genuino Geraldo de Oliveira por todo o suporte que me deram durante meu percurso acadêmico, por me incentivarem e vibrarem comigo a cada conquista.

Ao meu irmão, Welerson Silva de Oliveira, que sempre foi meu apoio. Foi essencial no meu processo de amadurecimento e crescimento. Por ter sido meu motivo para me tornar uma pessoa melhor, pelo incentivo, pela companhia, que continuará em minha memória para sempre. Além de toda a ajuda para que eu conseguisse as cinzas utilizadas na pesquisa.

À Professora Carmen Couto Ribeiro pela orientação, pela oportunidade de trabalharmos juntos, pela confiança em meu trabalho, pela dedicação, por todo o aconselhamento e por todo o crescimento pessoal e evolução na capacidade de análise crítica que tive neste período em que convivemos. Pela ética e pelo exemplo como professora e orientadora.

À Professora Marys Lene Braga Almeida pela coorientação. Pelas contribuições, que foram essenciais para o desenvolvimento do trabalho, pela parceria, pela didática, pelo interesse e apoio no desenvolvimento da pesquisa.

À Professora Joana Darc Silva Pinto e ao Professor Felipe de Souza Abreu, por todo o suporte, acesso aos laboratórios, ajuda com a obtenção dos insumos necessários, ensinamentos e colaborações que foram essenciais para o desenvolvimento, principalmente da parte prática da pesquisa. Ao Felipe e à Construtora Casa Nova por cederem o espaço e os equipamentos necessários para a realização das dosagens de concreto e pelo treinamento.

À Ana Luiza Halabi, pela ajuda com os ensaios de picnometria e por dispor de ajuda nos momentos em que precisei.

À Adecoagro por ceder as cinzas de bagaço de cana-de-açúcar utilizadas no trabalho.

À Vedacit e a MC- Bauchemie por fornecerem os aditivos utilizados no trabalho.

À Universidade Federal de Minas Gerais e à Pontifícia Universidade Católica de Minas Gerais por cederem o espaço físico e permitirem o uso dos equipamentos necessários à realização da pesquisa e aos técnicos e funcionários que colaboraram com a execução dos ensaios.

Aos meus amigos, a quem sempre recorro nos momentos que necessito de suporte.

E a todos que, direta, ou indiretamente, colaboraram para a realização deste trabalho

## Resumo

O estudo apresenta o panorama da utilização de cinzas de bagaço de cana-de-açúcar, do tipo “bottom ashes”, originadas da queima em cogeneradores de energia elétrica, com a finalidade de aplicação em concretos estruturais. Partindo da necessidade de caracterização dos concretos que empregam as cinzas, somada à crescente preocupação ambiental, que estimula a utilização eficiente dos materiais e o reaproveitamento de resíduos, apresenta-se uma revisão sistemática de literatura e o uso de cinzas brutas como material de substituição parcial de areia e cimento Portland em concreto, para corroborar com a possibilidade de tornar o resíduo em um coproduto. Para a substituição de cimento Portland por cinzas brutas, nos teores de 5, 10 e 15%, verifica-se que o ganho de resistência à compressão médio é de cerca de 1, 25 e 9%, o ganho de resistência à tração médio é de 3, 11 e 8%, respectivamente. O módulo de elasticidade para estes concretos é cerca de 20% menor que o apresentado pelo concreto de referência, no entanto é de 15 à 40% maior que os valores estimados seguindo metodologias propostas por normas estruturais. Os índices de vazios e taxas de absorção apresentaram valores inferiores à 20 e 10%, respectivamente, indicando boa durabilidade dos concretos produzidos. O potencial máximo de economia com as substituições de cimento em concretos nos teores de 5, 10 e 15%, para a produção de elementos estruturais prismáticos, são de 8, 25 e 18%. A partir deste estudo, verifica-se que a substituição parcial de cimento por cinzas brutas de bagaço de cana-de-açúcar apresenta viabilidade técnica e econômica para todos os teores testados, segundo os resultados obtidos para resistência à compressão, tração, módulo de elasticidade e absorção. Já a substituição parcial de areia por cinzas, embora seja capaz de incorporar maiores volumes de resíduos, o que é desejável do ponto de vista ambiental, apresenta bons resultados quando acompanhada de aditivo cristalizante.

Palavras-chave: Cinzas, Bagaço de cana-de-açúcar, Resíduos, Concreto, Substituição de cimento

## **Abstract**

The study presents an overview of the use of sugarcane bagasse ash ("bottom ashes" type), originated in cogenerators, with the purpose of application in structural concrete. Based on the need to characterize the concretes that use ash, and the growing environmental concern, which encourages the efficient use of materials and the reuse of waste, it's presented a systematic literature review and the use of raw ash as a replacement material in concrete, to corroborate the possibility of turning the residue into a co-product. In contents of 5, 10 and 15%, replacement of Portland cement caused average compressive strength gains of 1, 25 and 9%, and average tensile strength gains of 3, 11 and 8%, respectively. The modulus of elasticity for these concretes was about 20% lower than the concrete with no material replacement, however the values ranged from 15 to 40% higher than the estimated values. The void indices and absorption rates showed values below 20 and 10%, respectively, indicating good durability of the concretes. For the production of prismatic structural elements, the maximum savings potential from replacements of cement in concrete in 5, 10 and 15%, are 8, 25 and 18%, respectively. It was verified that the replacement of cement by raw sugarcane bagasse ash is technically and economically viable for all tested contents. On the other hand, the replacement of sand by ash only presents good results when accompanied by the addition of crystallizers. Although, this kind of replacement incorporates greater volumes of waste, which is desirable from an environmental perspective.

**Keywords:** Ashes, Sugarcane bagasse, Waste, Concrete, Cement replacement



## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1: Composição química por fluorescência de raios X de cinzas industriais .....	27
Figura 2: Composição química por fluorescência de raios X de cinzas de queima controlada .....	27
Figura 3: Comparação de valores médios e variação da composição das cinzas segundo sua gênese ..	28
Figura 4: Atendimento aos critérios de composição para classificação como pozolana classe E.....	30
Figura 5: Ganho de resistência com a substituição de cimento por cinzas (CBCA) – argamassas.....	38
Figura 6: Ganho de resistência obtido pela substituição parcial de cimento por cinzas (CBCA).....	38
Figura 7: Redução na carga elétrica passante no concreto produzido com CBCA.....	40
Figura 8: Etapas da pesquisa .....	47
Figura 9: Localização da área de disposição das cinzas e dos pontos de coleta .....	49
Figura 10: Fotos dos pontos de coleta de cinzas .....	50
Figura 11: Desenho esquemático – coleta de material para análise no picnômetro.....	53
Figura 12: Curva granulométrica da cinza bruta e agregados - peneiramento .....	56
Figura 13: Frações granulométricas .....	56
Figura 14: Variabilidade da finura das cinzas - peneiramento .....	57
Figura 15: Grãos de cinza de bagaço de cana de açúcar vistos em microscópio digital .....	59
Figura 16: Montagem do ensaio de reatividade das cinzas com cal CH-I .....	61
Figura 17: Evolução do pH nas soluções .....	61
Figura 18: Evolução da condutividade das soluções no tempo.....	62
Figura 19: Condutividade das cinzas em solução de CH-I - corrigida.....	62
Figura 20: Perda da condutividade no tempo .....	62
Figura 21: Aspecto e trabalhabilidade do concreto de referência .....	64
Figura 22: Aspecto e trabalhabilidade do concreto – dosagem 1 .....	65
Figura 23: Aspecto e trabalhabilidade do concreto – dosagem 2.....	65
Figura 24: Aspecto e trabalhabilidade do concreto – dosagem 3.....	65
Figura 25: Aspecto e trabalhabilidade do concreto – substituição cimento por CBCA.....	68
Figura 26: Absorção, índice de vazios e resistência – 3ª Fase .....	69
Figura 27: Massa específica dos concretos testados – 3ª Fase .....	69
Figura 28: Relação linear entre teor de substituição, absorção e índice de vazios.....	69
Figura 29: Comparação de resistências obtida – observada na revisão de literatura .....	70
Figura 30: Curvas Tensão x Deformação durante os ensaios .....	72
Figura 31: Estimativas e valor real do módulo de elasticidade .....	73
Figura 32: Relação entre o preço de cimento e o preço mínimo da cinza bruta .....	77

Figura 33: Ganho econômico da utilização das cinzas considerando a distância de transporte .....	77
Figura 34: Potencial de ganho econômico no consumo do material substituído .....	79
Figura 35: Resumo do potencial de ganho econômico da substituição parcial.....	79
Figura 36: Comparação entre ganhos econômicos da substituição de CP e areia.....	80
Figura 37: Ganho econômico – considerando ganho de resistência .....	82
Figura 38: Ganho econômico – mantendo o volume consumido.....	82

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Critérios de pesquisa - revisão sistemática sobre a composição das CBCA.....	26
Tabela 2: Critérios de pesquisa - revisão sistemática sobre substituições parciais de OPC por CBCA	36
Tabela 3: Módulo de elasticidade em concretos com substituições de cimento por CBCA.....	39
Tabela 4: Descrição das cinzas coletadas.....	50
Tabela 5: Métodos utilizados na caracterização dos agregados e aglomerante .....	51
Tabela 6: Métodos utilizados na caracterização das cinzas de bagaço de cana .....	51
Tabela 7: Consumo de materiais para a produção de 1m <sup>3</sup> de concreto .....	52
Tabela 8: Características dos agregados e cimento utilizados .....	55
Tabela 9: Composição das cinzas – Estimativa para os principais óxidos.....	58
Tabela 10: Material consumido para a produção de 1m <sup>3</sup> de concreto – Fase 2 .....	63
Tabela 11: Resultados dos ensaios de compressão e trabalhabilidade .....	64
Tabela 12: Dosagens utilizadas na substituição de cimento por CBCA .....	67
Tabela 13: Resultados dos ensaios de compressão e trabalhabilidade.....	67
Tabela 14: Regressão linear sendo x o valor percentual da substituição de cimento.....	69
Tabela 15: Resultados e estimativas para a resistência à tração.....	71
Tabela 16: Resultado dos ensaios de módulo de elasticidade .....	72
Tabela 17: Métodos de estimativa do módulo de elasticidade.....	73
Tabela 18: Relação de volume de vazios e volume de sólidos nos concretos.....	75
Tabela 19: Potencial de ganho econômico do uso dos concretos estudados.....	81

## LISTA DE ABREVIATURAS, SIGLAS E SÍMBOLOS

a	Relação entre $\rho_{seca}/\rho_{pic}$
a/c	Relação água/cimento
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ACI	“American Concrete Institute”
ACR	Reatividade álcali-carbonato
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Óxido de alumínio
Álcali <sub>Na2O</sub>	Porcentagem de álcalis, convertidos em Na <sub>2</sub> O, disponíveis
ANOVA	One way analysis of variance
ANTT	Agência Nacional de Transportes Terrestres
AS	“Australian Standards”
ASR	Reatividade álcali-sílica
ASTM	American Standard of Testing and Materials
b	Porcentagem de poros vazios do concreto ao qual a água não teve acesso pelo ensaios da ABNT NBR 9778:2009
BR	Rodovia Federal do Brasil
c	Porcentagem do volume total de concreto que pode ser acessado pelo gás He porém não pode ser acessado pela água
C2S	Silicato dicálcico
C3A	Aluminato tricálcico
C3S	Silicato tricálcico
C4AF	Aluminoferrita tetracálcica
CA	Coefficiente angular
CAPES	Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior
CaO	Óxido de cálcio
Ca(OH) <sub>2</sub>	Hidróxido de cálcio ou
CASH	Alumino-silicato de cálcio hidratado
CaSO <sub>4</sub> * 2H <sub>2</sub> O	Gipsita
CAV	Cinzas para análise de variabilidade
CBCA	Cinzas de bagaço de cana-de-açúcar
CC	Custo de carga e descarga
CC	Concreto convencional

CCD	Coeficiente de custo de deslocamento
CH-I	Cal hidratada Tipo I (ABNT NBR 6453: 2003)
CL	Coeficiente linear
cm	Centímetro
CO <sub>2</sub>	Dióxido de carbono
CP	Corpo de prova
CP II – E 32	Cimento Portland composto com escória granulada de alto forno
CP IV	Cimento Portland pozolânico
CP V -ARI	Cimento Portland de alta resistência inicial
C:S	Proporção entre cálcio e sílica
C-S-H	Silicato de cálcio hidratado
CSH <sub>2</sub>	Gipsita
Ct	Capacidade em toneladas
CT	Custo das cinzas brutas considerando somente transporte e operações de carga e descarga
CTC	Cinzas para teste em concreto
d	Diâmetro do corpo de prova [mm]
d <sub>10</sub>	Diâmetro equivalente à abertura da peneira ao qual apenas 10% das partículas (em massa) passam
d <sub>50</sub>	Diâmetro equivalente à abertura da peneira ao qual apenas 50% das partículas (em massa) passam
d <sub>90</sub>	Diâmetro equivalente à abertura da peneira ao qual apenas 90% das partículas (em massa) passam
DEMC	Departamento de Engenharia de Materiais de Construção
DM	Desvios médios amostrais
d <sub>máx</sub>	Diâmetro máximo das partículas
DP	Desvio padrão amostral
DRX	Difração de raios X
E	Empuxo
F	Força máxima obtida em ensaios de compressão diametral [kN]
f <sub>ck</sub>	Resistência característica do concreto aos 28 dias [MPa]
f <sub>cm</sub>	Média de resistências à compressão obtidas em ensaio [MPa]
f <sub>ctk</sub>	Resistência do concreto à tração direta [MPa]
f <sub>ctk, inf</sub>	Estimativa de limite inferior de resistência à tração [MPa]

$f_{ctk, sup}$	Estimativa de limite superior de resistência à tração [MPa]
$f_{ctm}$	Estimativa de resistência à tração média [MPa]
$Fe_2O_3$	Óxido férrico ou óxido de ferro (III)
$f_{td}$	Resistência à tração por compressão diametral [MPa]
G	Ganho de resistência aos 28 dias
g	Gramas
GPa	Giga Pascal
h	Hora
$h_0$	Hipótese nula
$h_1$	Hipótese alternativa
HC	“High strength concrete”
HE	Distribuições heteroscedásticas
HO	Distribuições homoscedásticas
IS	“Indian Standards”
IUPAC	International Union of Pure Applied Chemistry
$K_2O$	Óxido de potássio
[K <sub>2</sub> O]	Concentração de óxido de potássio
kg	Quilograma
km	Quilômetros
L	Comprimento do corpo de prova [mm]
LC	Perda de condutividade [%] (definido por Paya et al., 2001)
LOI	Perda de massa ao fogo (“loss on ignition”)
m	Metro
MEV	Microscopia eletrônica de varredura
MG	Minas Gerais
MgO	Óxido de magnésio
$m_i$	Massa do concreto imersa em água (ABNT NBR 9978: 2009) [g]
mm	Milímetro
MnO	Óxido de manganês
MPa	Mega Pascal
mS/cm	Mili Simiens por cm
$m_{sat}$	Massa do concreto saturada em água (ABNT NBR 9978: 2009) [g]
$m_{seca}$	Massa do concreto seca em estufa (ABNT NBR 9978: 2009) [g]
NA	Nível d’água

Na <sub>2</sub> O	Óxido de sódio
[Na <sub>2</sub> O]	Concentração de óxido de sódio
NBR	Norma Brasileira
NM	Norma do Mercosul
NZS	“New Zeland Standards”
OPC	Cimento Portland comum (“ordinary Portland Cement)
p	Valor-p (probabilidade de se obter uma estatística de teste igual ou mais extrema que aquela observada em uma amostra)
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	Pentóxido de fósforo
PCP	Preço do cimento Portland
PCE	Superplastificante de policarboxilatos à base de éter
P <sub>g</sub>	Potencial de ganho econômico sobre o consumo do material convencional analisado
pH	Potencial hidrogeniônico
P <sub>info</sub>	Porcentagem de óxidos em massa, desconsiderando o percentual de matéria orgânica
P <sub>real</sub>	Porcentagem de óxidos em massa, calculado considerando a porcentagem de matéria orgânica
PSCBA	Preço das cinzas de bagaço de cana-de-açúcar
PSCBA/CP	Relação do preço das cinzas de bagaço de cana-de-açúcar pelo preço do cimento Portland que será substituído pelas cinzas
PSCBA/material	Relação do preço das cinzas de bagaço de cana-de-açúcar pelo preço do material que será substituído pelas cinzas
PUC	Pontifícia Universidade Católica
R <sup>2</sup>	Coefficiente de determinação (regressões lineares)
RA-2	Redutor de água Tipo 2 (ABNT NBR 11768-1: 2019)
RV	Relação volumétrica entre um prisma projetado com concreto convencional e um prisma projetado com o concreto que utiliza as cinzas como material de substituição para resistir à um mesmo esforço de compressão
R\$	Real Brasileiro (BRL)
s	Segundo
s	Desvio padrão médio
s/	Sem

SCBA	Cinzas de bagaço de cana de açúcar (“sugar cane bagasse ash”)
SCM	Materiais cimentícios suplementares (“supplementary cementitious materials”)
SINAPI	Sistema Nacional de Pesquisas e Custos de Índices
SiO <sub>2</sub>	Dióxido de silício
SMF	Superplastificante sulfonados à base de melamina formaldeído
SNF	Superplastificante à base de naftaleno formaldeído sulfonado
SP	São Paulo (estado)
t	Toneladas
t	Teor da substituição de material convencional por cinzas
TiO <sub>2</sub>	Dióxido de titânio
V	Variação [%]
V <sub>sol</sub>	Porcentagem de volume sólido no volume total de concreto
V’ <sub>sol</sub>	Volume de concreto desconsiderando os poros e canais ocupados por água (obtido pelas relações estabelecidas na ABNT NBR 9778: 2009)
V’’ <sub>sol</sub>	Volume de concreto desconsiderando os poros e canais ocupados por gás He (obtido pela picnometria)
V <sub>v</sub>	Volume de vazios que podem ser preenchidos por He, porém que não podem ser preenchidos por água
UFMG	Universidade Federal de Minas Gerais
μ	Média amostral
μm	Micrometro
ρ	Densidade ou massa específica [g/cm <sup>3</sup> ]
ρ <sub>1</sub>	Massa específica do óxido de silício [g/cm <sup>3</sup> ]
ρ <sub>2</sub>	Massa específica do óxido de alumínio [g/cm <sup>3</sup> ]
ρ <sub>3</sub>	Massa específica do óxido de ferro [g/cm <sup>3</sup> ]
ρ <sub>pic</sub>	Massa específica obtida por picnometria (He) [g/cm <sup>3</sup> ]
ρ <sub>seca</sub>	Massa específica seca (ABNT NBR9978:2009) [g/cm <sup>3</sup> ]
σ <sub>amostral</sub>	Desvio padrão amostral
°C	Graus Célsius



# SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO</b>	<b>22</b>
<b>2</b>	<b>OBJETIVOS</b>	<b>23</b>
	2.1 Objetivo Geral	23
	2.2 Objetivos Específicos	23
<b>3</b>	<b>REVISÃO BIBLIOGRÁFICA</b>	<b>24</b>
	3.1 Utilização de Resíduos Agrícolas na Construção Civil	24
	3.1.1 Panorama Geral	24
	3.1.2 Aplicações em Concreto	24
	3.2 Cinzas de Bagaço de Cana-de-Açúcar (CBCA)	25
	3.2.1 Produção de Cinzas de Bagaço de Cana-de-Açúcar	25
	3.2.2 Características das Cinzas de Bagaço de Cana-de-Açúcar	26
	3.3 Aplicação de CBCA em concretos e argamassas	33
	3.3.1 Substituição de Cimento Portland por CBCA	36
	3.3.2 Substituição de Areia por CBCA	40
	3.3.3 Uso de Adições e Aditivos em Concretos que empregam CBCA	41
	3.3.4 Durabilidade	44
<b>4</b>	<b>MATERIAIS E MÉTODOS</b>	<b>47</b>
	4.1 Materiais	48
	4.2 Caracterização dos Materiais	51
	4.3 Produção e Caracterização do Concreto	51
	4.4 Análises Econômicas	53
<b>5</b>	<b>RESULTADOS</b>	<b>55</b>
	5.1 Primeira Fase	55
	5.1.1 Caracterização dos materiais	55
	5.1.2 Caracterização das cinzas	55

5.1.3	Reatividade das cinzas	59
<b>5.2</b>	<b>Segunda Fase</b>	<b>62</b>
5.2.1	Resistência e durabilidade	63
<b>5.3</b>	<b>Terceira Fase</b>	<b>66</b>
5.3.1	Resistência e durabilidade	67
5.3.2	Módulo de elasticidade	72
5.3.3	Análises de picnometria (He)	74
5.3.4	Análise de viabilidade econômica	76
<b>6</b>	<b>CONCLUSÕES</b>	<b>84</b>
<b>7</b>	<b>PROPOSTAS PARA ESTUDOS FUTUROS</b>	<b>86</b>
	<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS</b>	<b>87</b>
	<b>ANEXO A – Composição das CBCA</b>	<b>101</b>
	<b>ANEXO B – Ganho de Resistência em Concreto Utilizando CBCA</b>	<b>105</b>
	<b>ANEXO C – Custo do Transporte de Cinzas Brutas</b>	<b>108</b>
	<b>ANEXO D – Ensaio de Absorção de Água</b>	<b>109</b>

# 1 INTRODUÇÃO

A utilização de resíduos de atividades industriais como material de construção civil tem se estabelecido como uma forma de minimizar problemas relacionados à disposição de resíduos e impactos negativos causados pela extração e processamento de matérias-primas que originam os materiais convencionais de construção civil. Isto reduz a dependência de recursos naturais e por se tratar de resíduos, o consumo energético e a geração de poluentes já foram considerados na produção de um bem de consumo, portanto o uso destes materiais em sua forma bruta não implica em impactos exteriores ao processo de transporte.

Embora o emprego de cinzas de cana-de-açúcar na produção de concreto tenha sido alvo de estudos, principalmente na última década, não há um consenso acerca das características desenvolvidas pelo produto quanto a resistência e durabilidade. Isto se deve às diferenças nos processos que produzem as cinzas, tipos de beneficiamento, quantidades empregadas e metodologias de avaliação.

Desta maneira, o estudo apresentado visa o desenvolvimento de formas de utilização das cinzas na produção de concretos resistentes e duráveis, que impliquem em ganhos econômicos e ambientais. Foram utilizadas cinzas brutas de cana-de-açúcar do tipo “bottom ashes” para a substituição parcial de cimento e de agregado miúdo na produção de concreto.

Sendo assim, a pesquisa apresenta como principais justificativas:

- reduzir os volumes de disposição de resíduos e de áreas necessárias à sua disposição, aplicando o material em métodos construtivos que visam a sustentabilidade, a redução dos impactos ambientais, gerando ganhos econômicos;
- avaliar a resistência e durabilidade de concretos produzidos com emprego de cinzas de bagaço de cana de açúcar e verificar a possibilidade de uso das cinzas sem aplicação de métodos de beneficiamento para a substituição parcial de agregado miúdo e cimento Portland.

## **2 OBJETIVOS**

### **2.1 Objetivo Geral**

O objetivo geral do trabalho é avaliar a viabilidade do uso do resíduo das caldeiras de cogeração de energia por queima de biomassa de cana-de-açúcar como um coproduto, incorporando as cinzas na produção de concreto sem implementação de processos de beneficiamento, visando a obtenção de um produto resistente, durável e economicamente viável.

### **2.2 Objetivos Específicos**

Os objetivos específicos da pesquisa são:

- apresentar uma revisão sistemática da literatura acerca da utilização de cinzas de bagaço de cana como substituinte parcial de cimento Portland e agregado miúdo;
- avaliar diferentes substituições na dosagem do concreto para incorporação das cinzas de bagaço de cana quanto ao desempenho mecânico;
- verificar as características do concreto que emprega cinzas de bagaço de cana-de-açúcar como material substituinte, com relação à durabilidade;
- analisar a utilização de aditivo cristalizante conjuntamente com a substituição de agregado miúdo por cinzas, quanto às alterações de resistência e durabilidade;
- verificar a possibilidade de ganhos econômicos com o emprego das cinzas de bagaço de cana-de-açúcar como material de substituição em concretos estruturais.

### 3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

#### 3.1 Utilização de Resíduos Agrícolas na Construção Civil

##### 3.1.1 *Panorama Geral*

A incorporação de resíduos em produtos de construção civil é uma das aplicações mais comumente propostas como forma alternativa à disposição devido ao seu custo-benefício e ao volume de insumos utilizados por este setor. O uso destes materiais evita que maiores áreas sejam necessárias à acomodação de resíduos, reduz os custos com disposição e tratamento, evita a geração de poluição e contaminações e colabora para que se reduza a pressão de exploração de novos recursos naturais utilizados na produção de materiais tradicionais de construção (MO et al., 2016).

As aplicações finais potenciais incluem aterro de construção, agregado de concreto e pavimentação. No entanto, uma aplicação como substituinte ou complemento de um aglomerante em um produto de concreto (por exemplo, substituição parcial de cimento Portland) apresentaria maiores potencialidades de aplicação pelo valor econômico representado pela substituição, bem como pelo benefício ambiental intrínseco resultante de uma integração mais completa do material residual em um produto solidificado (PARIS *et al.*, 2016).

##### 3.1.2 *Aplicações em Concreto*

O reaproveitamento dos resíduos agrícolas possibilita a redução da dependência de materiais convencionalmente utilizados na produção do concreto, cuja obtenção pode impactar negativamente o meio ambiente. O uso excessivo de agregados naturais pode levar ao esgotamento desses recursos, e as atividades de extração destes materiais podem causar danos paisagísticos, perturbação do ecossistema e contaminação da água, solo e ar. Já o processo de fabricação de cimento impacta com alto consumo energético (sendo o terceiro maior consumo dentre as atividades industriais no mundo) e emite gases estufa, gerando de 5 a 8% das emissões de CO<sub>2</sub> mundiais anuais e cerca de 26% das emissões industriais (GONZÁLEZ-KUNZ *et al.*, IEA, 2021; MO *et al.*, 2016; SHAMSAEI *et al.*, 2021). Apesar dos esforços mundiais na redução na emissão de gases estufa, é esperado que, em 2050, as emissões diretamente relacionadas à produção de cimento no mundo tenham aumentado em 4% (IEA, 2021).

Nos últimos anos, uma série de pesquisas têm sido executadas objetivando o aproveitamento de resíduos agrícolas na confecção de concreto, destacando-se resíduos de bambu, banana, milho, trigo, sisal, grama, açúcar, álcool, coco, arroz, ostra, berbigão e mariscos. Esses materiais podem ser utilizados na forma de agregado, reforço de fibra, ou ainda como material cimentício suplementar (MCS). Além de reduzir o impacto negativos da mineração de agregados e produção do cimento, o aproveitamento reduz os volumes de descartes do setor agrícola (MO *et al.*, 2016).

A utilização de resíduos da queima de biomassa como material de substituição parcial do cimento no concreto é possível porque as plantas obtêm vários minerais e silicatos da terra durante o crescimento. Materiais inorgânicos, especialmente silicatos, são encontrados em maiores proporções em plantas cultivadas anualmente do que em árvores de vida longa e isso permite que seus resíduos se tornem uma fonte potencial de material de substituição de cimento com reatividade pozolânica. A sílica, que é absorvida do solo pelas raízes, se acumula entre a cutícula da planta e as paredes celulares, atuando como uma barreira física contra a penetração de fungos patogênicos e reduzindo a perda de água através da transpiração. Outra fonte de sílica nas cinzas é areia (quartzo), que não é completamente removida no transporte e processamento das plantas (SALES, LIMA, 2010).

## **3.2 Cinzas de Bagaço de Cana-de-Açúcar (CBCA)**

### *3.2.1 Produção de Cinzas de Bagaço de Cana-de-Açúcar*

O Brasil tem tradição na produção de cana-de-açúcar desde o século XVIII. No entanto, foi apenas no fim do século XX que o país começou a investir na viabilização do álcool como fonte de energia alternativa ao petróleo, que foi impulsionada no início do século XXI. Hoje, o Brasil produz cerca de 60% do álcool etílico (etanol) consumido em todo o mundo e é o maior produtor mundial de açúcar, tendo tido a produção de 665,1 milhões de toneladas de cana no ano de 2020 (CONAB, 2020).

No entanto, o setor sucroalcooleiro ainda busca soluções para destinar os resíduos gerados pelos processos de produção de açúcar e álcool, dentre eles o bagaço (SALES, LIMA, 2010). Este material é um resíduo gerado na produção sucroalcooleira que pode ser usado como biomassa para geração de energia, sendo esta modalidade a segunda maior fonte de energia

renovável do Brasil, ocorrendo a safra da cana no período de menor nível dos reservatórios hidrelétricos da região centro-sul do país (UNICA, 2020).

A queima do bagaço gera cinzas, que constituem os últimos resíduos na cadeia produtiva, que normalmente é destinado a aterros ou áreas inadequadas. Cada tonelada de bagaço queimado gera 25 kg de cinzas. Algumas indústrias destinam as cinzas ao uso como fertilizante nas plantações, mas este material não possui nutrientes minerais adequados para este propósito. No entanto, a cinza pode ser usada como material substituinte parcial do cimento ou areia na construção civil tanto como material de aterro, quanto na produção de tijolos ou de concreto (SALES, LIMA, 2010; Cordeiro *et al.*, 2009).

### 3.2.2 Características das Cinzas de Bagaço de Cana-de-Açúcar

Foi realizada uma investigação científica com objetivo reunir, avaliar e conduzir uma síntese dos resultados de múltiplos estudos primários sobre a composição das cinzas de bagaço de cana-de-açúcar. Sendo assim, será apresentada uma abordagem qualitativa acerca dos dados encontrados na bibliografia disponível que se enquadraram nos critérios de seleção estabelecidos na Tabela 1.

Tabela 1: Critérios de pesquisa - revisão sistemática sobre a composição das CBCA

Critério de pesquisa	Critérios de exclusão
(1) Base de dados eletrônica consultada: Web of Science e dissertações do DEMC-UFMG	(1) Não consta a composição química da cinza por fluorescência de raios X;
(2) período de pesquisa 2001-2020;	(2) Não consta a porcentagem de LOI nas cinzas;
(3) palavras-chave utilizadas: sugarcane+bagasse+ash+concrete; e sugarcane+bagasse+ash+mortar	(3) Não consta o processo de origem das cinzas
(4) somente artigos em inglês	(4) Aplicação de tratamentos no bagaço previamente à queima
(5) texto integralmente disponível pelo portal de periódicos da CAPES	(5) Queima de outras partes da cana sem ser o bagaço
(6) ao menos duas palavras-chave no título	(6) Cinzas industriais de limpeza de filtros e sistema de tratamento de gases

Os materiais encontrados nos trabalhos foram separados quanto à sua gênese em cinzas originadas em queima industrial “bottom ashes” e cinzas produzidas em queima controlada, para efeito de comparação de sua constituição e de suas propriedades.

No gráfico da Figura 1, está representada a composição química típica das cinzas provenientes de queima industrial segundo as referências listadas na Tabela 1 do Anexo A. Foram analisados 58 materiais utilizados em 50 trabalhos, sendo consideradas apenas as cinzas do tipo

“bottom ashes”. Enquanto que na Figura 2, está representada a composição química típica de cinzas originadas em processos de queima controlada. A forma de queima em cada referência está listada na Tabela 2 do Anexo A, tendo sido encontrados 23 materiais de 18 trabalhos.

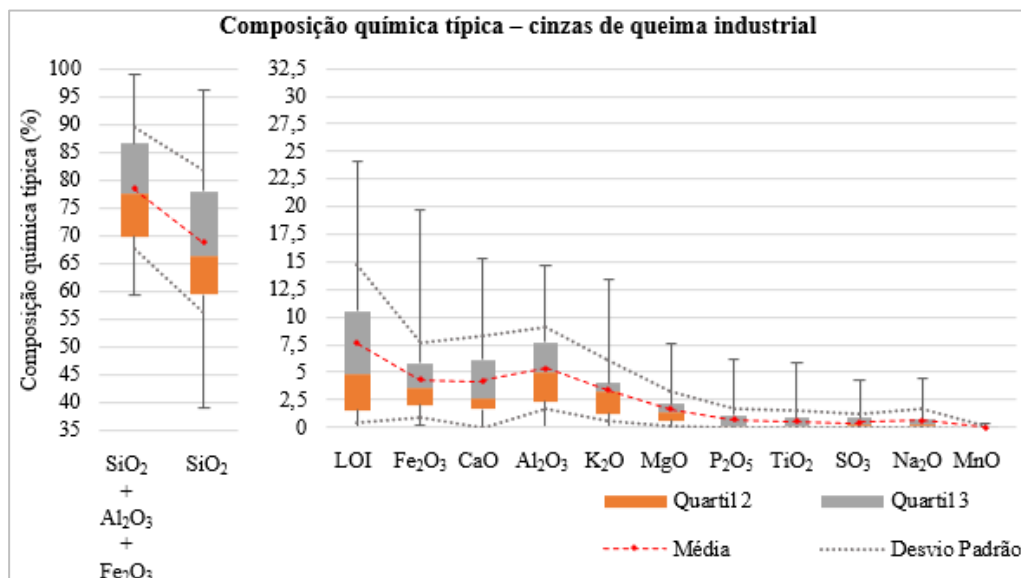


Figura 1: Composição química por fluorescência de raios X de cinzas industriais (Gráfico elaborado a partir dos resultados dos autores listados na Tabela 1 do Anexo A)

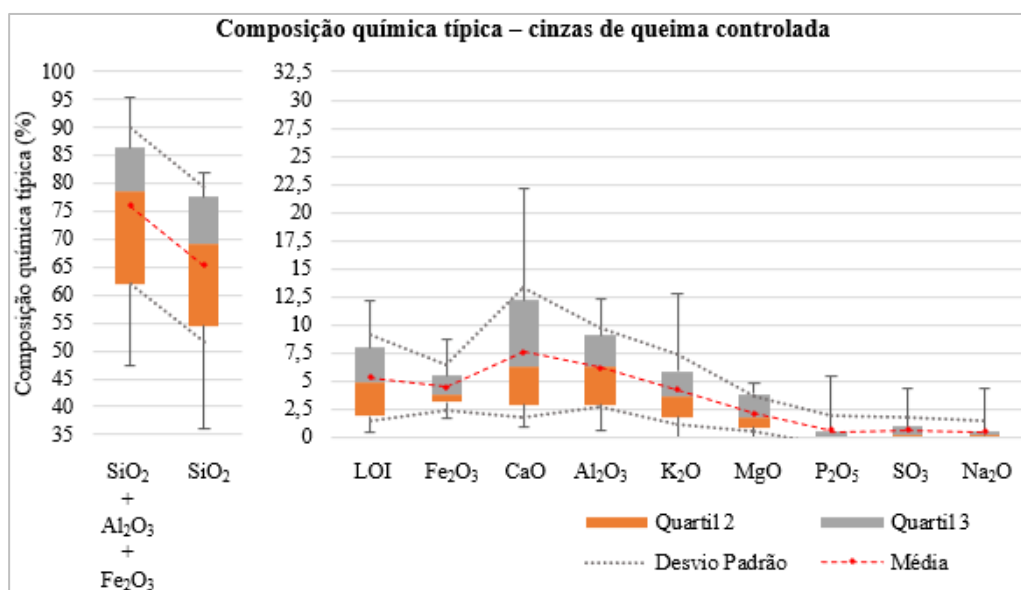


Figura 2: Composição química por fluorescência de raios X de cinzas de queima controlada (Gráfico elaborado a partir dos resultados dos autores listados na Tabela 2 do Anexo A)

Já a Figura 3 apresenta um comparativo entre a composição média encontrada para as amostras de cinzas oriundas de queima industrial com as cinzas queimadas sob condições controladas. Também estão representadas as variações encontradas para os componentes das amostras de cinza em cada condição de queima, sendo a variação dada na Equação 1.



$$V(\%) = 100 \times \frac{\sigma_{\text{amostral}}}{\mu} \quad (1)$$

Em que:

V(%): variação dada em porcentagem;

$\sigma_{\text{amostral}}$ : desvio padrão amostral; e

$\mu$ : teor médio.

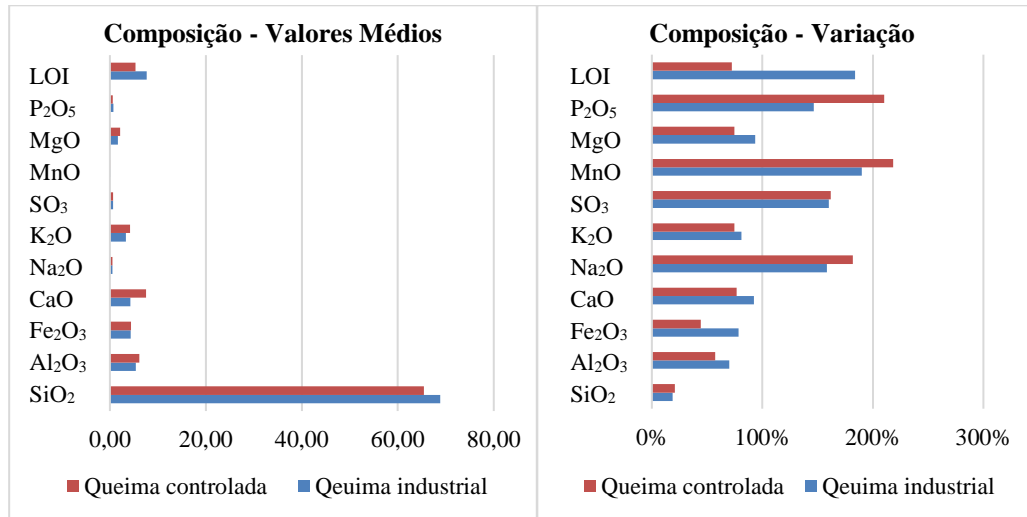


Figura 3: Comparação de valores médios e variação da composição das cinzas segundo sua gênese (Gráfico elaborado a partir dos resultados dos autores listados nas Tabelas 1 e 2 do Anexo A)

Realizando o teste-t student (bicaudal) para os dados coletados da composição da cinza para cada óxido, com confiabilidade de 95%, observa-se que a distribuição dos valores para cinzas oriundas de queima industrial não pode ser considerada similar à distribuição dos valores encontrados em cinzas de queima controlada (Tabela 4, Anexo 1), devendo os grupos serem estudados separadamente. Houve similaridade na distribuição estatística somente para os óxidos de cálcio e magnésio ( $p < 0,05$ ). Parte da variação dos componentes das cinzas provenientes de queima industrial advém das metodologias empregadas na quantificação dos materiais; quando peneirada, as cinzas tendem a apresentar menores teores de material não queimado e, portanto, menores valores para LOI. Segundo (BAHURUDEEN *et al.*, 2014), o teor de carbono não queimado presente na cinza bruta estudada era de 21%, realizado o peneiramento e a remoção de partículas fibrosas no material houve uma redução da perda na ignição para 3-6%. Já de acordo com BAHURUDEEN *et al.* (2016), enquanto o valor de perda ao fogo (LOI) para a cinza bruta utilizada foi de 19%, o LOI em partículas grosseiras fibrosas presentes na cinza foi de 74,4% e nas partículas finas não totalmente queimadas, foi de 71,5%.

A partir dos gráficos da Figura 1, 2 e 3, é possível verificar que a composição das cinzas apresenta grande variação quanto ao seu processo de origem. Também é possível verificar que a variação dos principais componentes (Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, LOI, CaO, K<sub>2</sub>O e MgO), com exceção ao

SiO<sub>2</sub>, se reduz quando controlados a temperatura, o tempo de queima e o fornecimento de oxigênio.

As plantas consomem soluções de ácido ortossilícico do solo, que mais tarde é polimerizada como sílica amorfa nas células vegetais. A queima no processo de cogeração, pode gerar sílica amorfa reativa, que juntamente com quartzo oriundo de contaminação da cana com solo, existem como principais componentes minerais nas cinzas residuais, compondo o teor de óxidos de silício (BAHURUDEEN *et al.*, 2014).

Dois componentes se destacam na comparação entre as cinzas, os teores máximo e médio de LOI são reduzidos pela metade e os teores máximo e médio de CaO aumentam em cerca de 50%, quando empregada a queima controlada. Havendo, portanto, um indício de que atividades de monitoramento e controle de temperatura nas caldeiras seriam medidas eficientes para a geração de cinzas com melhores propriedades e com maior aplicabilidade por redução na variabilidade ao longo da atividade industrial.

As amostras de cinza bruta industriais de bagaço consistem em um conjunto de partículas com diferentes características. Geralmente, em sua maior parte, as partículas de CBCA são finas (<75µm) e completamente queimadas. No entanto, é comum que se observe partículas fibrosas não completamente queimadas. A estrutura e o tamanho dessas partículas fibrosas são totalmente diferentes das partículas finas queimadas. A queima incompleta do material leva à presença de maiores teores de partículas fibrosas nas cinzas, que apresentam estruturas celulares, enquanto que os finos podem apresentar formas irregulares. Partículas fibrosas tendem a apresentar menor reatividade devido ao alto teor de carbono em sua composição elementar. Já a irregularidade morfológica das partículas constitui uma possível razão para a perda de fluidez em pastas de cimento à base de CBCA (BAHURUDEEN *et al.*, 2014).

A Figura 4 mostra a quantidade de materiais encontrados na literatura que atenderam os pré-requisitos de composição química para classificação como pozolana classe E, com base na norma NBR 12653 de 2014, que dispõe sobre as condições exigíveis para materiais pozolânicos para uso como adição. A conversão de álcalis disponíveis em Na<sub>2</sub>O foi feita segundo indicado na Equação 2.

$$\text{Álcali}_{\text{Na}_2\text{O}} = [\text{Na}_2\text{O}] + 0,658 \times [\text{K}_2\text{O}] \quad (2)$$

Em que:

$\text{Álcali}_{\text{Na}_2\text{O}}$ : porcentagem de álcalis disponíveis convertidos em  $\text{Na}_2\text{O}$ ;

$[\text{Na}_2\text{O}]$ : porcentagem em massa de  $\text{Na}_2\text{O}$  no material; e

$[\text{K}_2\text{O}]$ : porcentagem em massa de  $\text{K}_2\text{O}$  no material.

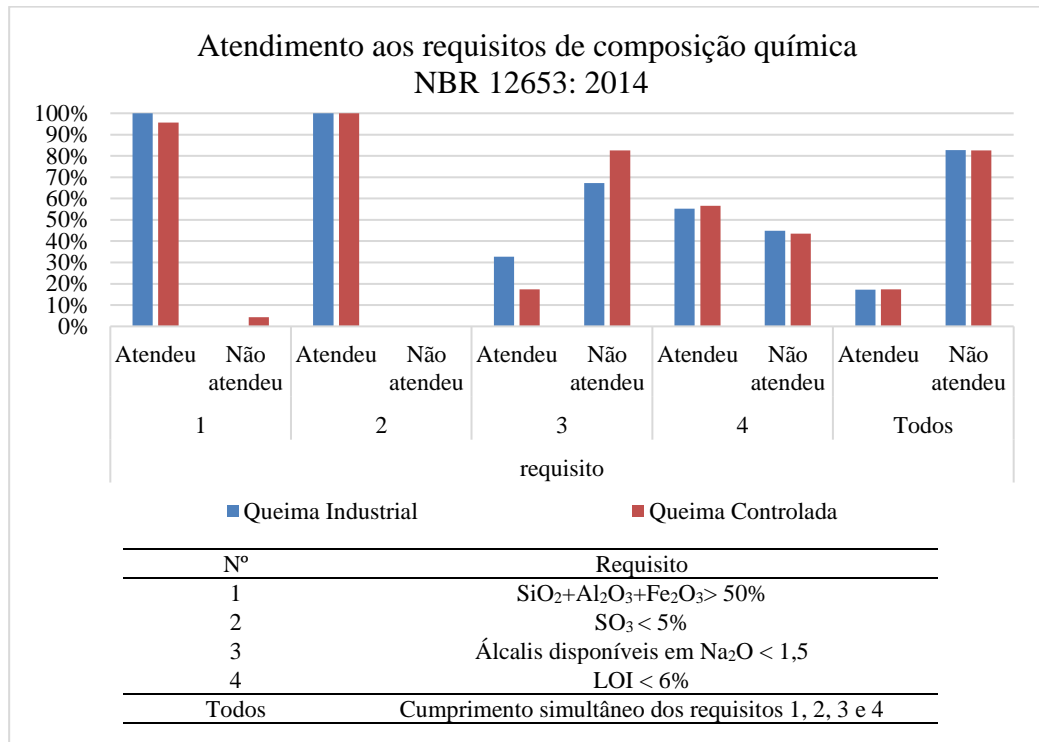


Figura 4: Atendimento aos critérios de composição para classificação como pozolana classe E (Gráfico elaborado a partir dos resultados dos autores listados nas Tabelas 1 e 2 do Anexo A)

A partir da análise da Figura 4, depreende-se que apenas 17% dos materiais analisados de ambas as origens (queima industrial e queima controlada) cumpriram simultaneamente todos os requisitos de composição química estabelecidos pela NBR 12653: 2014 para que pudessem ser classificados como materiais pozolânicos classe E. Todos os materiais possuem quantidades de óxidos de enxofre adequadas à classificação. Apenas o material estudado por Praveenkumar e Sankarasubramanian (2019) não apresentou o somatório de óxidos de silício, alumínio e ferro superior a 50% em massa do material. Mais da metade dos materiais analisados de queima industrial e de queima controlada (55 e 57% respectivamente), apresentou  $\text{LOI} < 6\%$ . O critério com menor aprovação de materiais foi o teor de álcalis disponíveis convertidos em  $\text{Na}_2\text{O}$  ser inferior a 1,5% em massa.

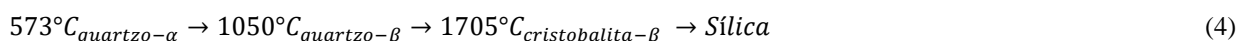
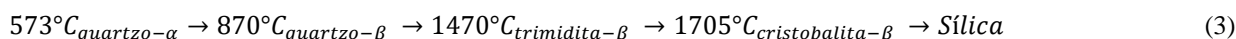
Verificou-se que, quanto à composição, para a classificação como material pozolânico, a presença de material orgânico é um impeditivo que atinge maior porcentagem em materiais de

queima industrial. Já o teor de álcalis, é um impeditivo que afeta mais as cinzas oriundas de queimas controladas.

Quanto ao índice de atividade pozolânica (NBR 5752: 2014), cinzas brutas de bagaço de cana de açúcar provenientes de queima industrial podem apresentar valores de atividade pozolânica menores do que preconizados na norma NBR 12653: 2014; sendo indicado o peneiramento, moagem e requeima como possíveis tratamentos para se atingir melhores índices de atividade pozolânica (BAHURUDEEN *et al.*, 2014; BAHURUDEEN *et al.*, 2016).

Cinzas volantes produzidas sob calcinação controlada e com finura apropriada têm um teor significativo de sílica amorfa e podem exibir altas reatividades pozolânicas. No entanto, cinzas de caldeiras de geração de energia têm alto teor de quartzo, menores conteúdos de sílica amorfa e menores reatividades (ALMEIDA *et al.*, 2015).

Geralmente, à pressão atmosférica normal quartzo- $\alpha$  se transforma a 573° C em quartzo- $\beta$ , a 870° C em tridimita- $\beta$  e depois para cristobalita- $\beta$  a 1470° C; em 1705° C finalmente derrete (Equação 3). No entanto, a menos que haja impurezas, o quartzo- $\beta$  geralmente não se transforma em tridimita- $\beta$  a transição é ignorada e a sequência fica conforme indicado na Equação 4 (ARIF *et al.*, 2016).



Enquanto as mudanças de temperatura forem lentas, o processo é totalmente reversível, porém maior complexidade é gerada em aquecimentos ou resfriamentos abruptos. Por exemplo, o aquecimento muito rápido do quartzo mostra que ele ainda passará por uma fase transição para quartzo- $\beta$ , e, então, irá então "pular" a transição cristobalita- $\beta$ , derretendo a uma temperatura muito abaixo de 1550° C. Da mesma forma, se sílica fundida é resfriada rapidamente, sua estrutura líquida desordenada será preservada como um super líquido resfriado ou um vidro de sílica amorfo; lechatelierita quando encontrado na natureza (ARIF *et al.*, 2016).

A temperatura e o fornecimento de oxigênio podem alterar os produtos obtidos e a cristalinidade da sílica. Sílicas amorfas ou parcialmente cristalinas são importantes para as reações com hidróxido de cálcio no concreto, sendo a sílica amorfa formada entre 500 e 800° C. Processos de cristalização em cinzas de bagaço de cana começam à 800° C, transformando a sílica amorfa em cristobalita ou em tridimita. Entre 400° C e 800° C há grande perda de massa das cinzas

por queima de material orgânico e entre 550 e 700°C o material resultante consiste em partículas esponjosas, pois a temperatura de fusão da CBCA ainda não foi atingida. Especula-se que uma queima à 800°C por 30 minutos seria a condição de queima ideal, pois a cinza resultante teria o maior grau de amorfismo, menor densidade e maior área superficial (JOSHAGHANI, MOENI, 2017).

Com relação à densidade das cinzas, foi possível verificar uma variação de cerca de 15%, o menor valor observado foi de 1,25g/cm<sup>3</sup> (MODANI *et al.*, 2013) e a densidade máxima foi de 2,75g/cm<sup>3</sup> (CASTRO, MARTINS, 2016), sendo o valor médio e a moda, respectivamente, 2,22 e 2,53g/cm<sup>3</sup>. Foram encontradas correlações entre os teores de óxidos e a densidade das cinzas considerando tanto as de origem industrial quanto as de origem controlada (Tabela 3 do Anexo A), sendo notáveis a influência da porcentagem em massa dos óxidos de silício, ferro e alumínio no valor da densidade. A relação que apresentou resultados mais satisfatórios foi a descrita pela Equação 5.

$$\rho = CA \times [(\%)SiO_2 \times \rho_1] + [(\%)Al_2O_3 \times \rho_2] + [(\%)Fe_2O_3 \times \rho_3] \quad (5)$$

Sendo:

$CA$  coeficiente angular,  $CA= 0,9616$  para qualquer cinza avaliada ( $R^2=0,9796$ , erro quadrático médio de 0,3g/cm<sup>3</sup>) e  $CA= 0,9181$  para cinzas com  $LOI < 10\%$  e somatório de óxidos de silício, ferro e alumínio superior à 65% ( $R^2=0,9851$ , erro quadrático médio de 0,2g/cm<sup>3</sup>).

$\rho$  densidade das cinzas em g/cm<sup>3</sup> e aproximação de uma casa decimal

$(\%)SiO_2$  porcentagem (em decimais) de óxido de silício em massa

$(\%)Al_2O_3$  porcentagem (em decimais) de óxido de alumínio em massa

$(\%)Fe_2O_3$  porcentagem (em decimais) de óxido de ferro em massa

$\rho_1$  densidade média dos óxidos de silício 2,65g/cm<sup>3</sup>

$\rho_2$  densidade média dos óxidos de alumínio 3,95g/cm<sup>3</sup>

$\rho_3$  densidade média dos óxidos de ferro 5,24g/cm<sup>3</sup>

A partir das regressões (Tabela 3 do Anexo A) verifica-se que há uma forte correlação entre o teor de óxidos de silício e a densidade das cinzas ( $R^2 = 0,97$ ), a relação entre óxidos de ferro e alumínio, por si só não são determinantes no valor da densidade ( $R^2=0,69$  e  $0,3$ ). Entretanto, quando combinados os valores de óxidos de silício, ferro e alumínio, que são os principais envolvidos nas reações pozolânicas, verificam-se os melhores ajustes lineares ( $R^2=0,98$ ). O teor de matéria orgânica não apresenta forte relação com a densidade ( $R^2=0,06$ ), o que pode ser explicado pela alta variabilidade da densidade média do bagaço de cana e segundo

grau de compactação prévio (RASI et al, 2020; SILVA, MORAIS, 2008). Embora tenham sido elaboradas relações com bons coeficientes de determinação ( $R^2$  próximos de 1), verifica-se que o desvio médio entre os valores observados e os valores resultantes das equações é da ordem de 10 à 20% do valor médio das densidades, o que significa que as estimativas obtidas devem ser consideradas dentro de um intervalo de grande amplitude e podem não resultar em valores realistas, sendo recomendado o uso destas equações somente em conjunto com observações que permitam determinar os valores de forma direta.

### 3.3 Aplicação de CBCA em concretos e argamassas

Observa-se nos diversos trabalhos publicados que, para a produção de concretos e argamassas, as cinzas de bagaço de cana de açúcar (CBCA) podem ser utilizadas como substituição parcial ao cimento (ARIF *et al.*, 2016; BATOOL *et al.*, 2020; BERENGUER *et al.*, 2016; COREDEIRO *et al.*, 2009; DE PAULA *et al.*, 2010; GAR *et al.*, 2017; JAGADESH *et al.*, 2018; JAVED *et al.*, 2020; PEREIRA *et al.*, 2018; RERKPIBOON *et al.*, 2015), substituição parcial do agregado miúdo (SALES, LIMA, 2010; MORETTI *et al.*, 2018) e como adição. Devido ao uso limitado de CBCA como um material cimentício complementar, as informações a respeito da utilização como substituto do cimento Portland no concreto não estão amplamente documentadas (PARIS *et al.*, 2016).

O estado atual da pesquisa sobre concretos empregando cinza de bagaço de cana-de-açúcar (CBCA) tem informações esparsas com relação aos aspectos de durabilidade de resistência ao congelamento/descongelamento, resistência química à intrusão de cloreto ou álcali e permeabilidade. As interações entre concretos com CBCA e adições químicas não estão bem documentadas. Como acontece com a maioria dos materiais que empregam resíduos, a heterogeneidade das diferentes fontes geradoras é um problema e são necessárias pesquisas de tratamentos para lidar com inconsistências químicas e morfológicas (PARIS *et al.*, 2016).

Materiais cimentícios suplementares (SCM) geralmente se enquadram em uma de duas categorias: autocimentante ou pozolânico. Os materiais autocimentantes reagem de maneira semelhante ao cimento Portland (OPC); em que, a mistura resultante endurece durante uma reação hidráulica irreversível quando combinada com água. Uma pozolana é um material, principalmente de composição siliciosa, que por si só não possui propriedades cimentícias na

presença de água. Porém, se exposta à água e ao cálcio (geralmente na forma de cal), ela se hidrata apresentando propriedades cimentícias (PARIS *et al.*, 2016).

Pozolanas podem ser classificadas como artificiais ou naturais. Pozolanas naturais são materiais que permanecem inalterados desde seu estado natural de mineração, eventualmente passando apenas por redução de tamanho e/ou calcinação. Já as pozolanas artificiais são materiais produzidos ou alterados por processos antropogênicos, em muitos casos, são resíduos de uma aplicação industrial (como a cinza volante de carvão). São pozolanas artificiais: escória de alto forno granulada moída, cinza de casca de arroz, cinza de bagaço de cana-de-açúcar, sílica ativa, vidro reciclado, cinza de combustão de biomassa e cinza volante de carvão (PARIS *et al.*, 2016).

O cimento Portland (OPC) é composto principalmente por quatro óxidos, cujas proporções podem variar: silicato tricálcico (C3S), silicato dicálcico (C2S), aluminato tricálcico (C3A) e aluminoferrita tetracálcica (C4AF) (PEDRAJAS *et al.*, 2014). Em uma reação de hidratação, dois óxidos (C3S e C2S) reagem com água para formar géis de silicato de cálcio hidratado (C-S-H), que são os aglomerantes em argamassas e concretos. Outro produto da hidratação desses óxidos é o  $\text{Ca(OH)}_2$ ; que pode reagir com a sílica para formar mais C-S-H. Essa reação secundária é denominada “reação pozolânica” e além de contribuir para o aumento da resistência, reduz o teor de óxidos de cálcio, que podem originar reações expansivas por fixação de água prejudiciais, caso ocorram pós endurecimento do concreto (PARIS *et al.*, 2016).

Em um sistema de cimento Portland (OPC) puro, a conversão em C-S-H gera uma abundância de produtos de cálcio, geralmente na forma de portlandita ( $\text{Ca(OH)}_2$ ); a adição de SCM rico em sílica irá reagir com a portlandita para produzir mais gel C-S-H com uma razão C: S (proporção de cálcio por silicato) mais baixa. Além disso, alguns SCM comumente usados, incluindo cinza volante de carvão, metacaulim, escória de alto-forno e cinza de bagaço de cana-de-açúcar, contêm alumínio em maior quantidade do que o cimento Portland. Géis C-S-H que têm um C: S mais baixo tendem a ter o benefício adicional de maior absorção de alumínio, criando um gel CASH além do C-S-H (PARIS *et al.*, 2016).

Embora a relação C: S tenha sido estudada como uma característica secundária dos cimentos hidratados, o uso como um indicador além do qualitativo não chegou a um consenso; até porque diferentes métodos experimentais resultam em ampla gama de valores para C: S para a mesma pasta hidratada. O consenso é que a adição de um SCM estável nas proporções corretas pode equilibrar quimicamente o sistema, contribuindo para uma série de benefícios positivos.

Porém, os efeitos advindos das substituições de cimento Portland por SCM podem variar dependendo de uma série de condicionantes tais quais a composição química e propriedades físicas dos materiais que compõe o concreto, a forma e o ambiente na qual se realiza a aplicação (PARIS *et al.*, 2016).

Óxidos de menores concentrações presentes em um sistema cimentício podem afetar o desempenho e a durabilidade do concreto e da argamassa. Alguns destes componentes são a gipsita ( $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$  ou CSH2) e outros sulfatos, e álcalis como potássio e sódio. O sulfato é introduzido na produção de cimentos, na maioria das vezes, na forma de gesso (tipicamente, aproximadamente 4,5%); para regular a “pega” (endurecimento) do cimento. A adição de sulfato é realizada para melhorar o conjunto de *flash* causado pela hidratação excessiva de C3A; no entanto, limitar as adições de sulfato é comum para evitar a formação retardada de etringita e falsa pega. Quando o excesso de sulfatos solúveis não reage completamente, os concretos tendem a sofrer um fenômeno conhecido como “ataque interno de sulfato” ou “formação retardada de etringita”, os sulfatos presentes na microestrutura reagem formando produtos químicos mais volumosos após a pega do concreto. Isto provoca tensões internas no concreto que leva à fissuração. Esta reação tende a ocorrer apenas quando a condição de supersulfatação é combinada com temperaturas elevadas (superiores à 70°C) durante a hidratação (PARIS *et al.*, 2016).

Os álcalis normalmente constituem uma porção inferior a 3% em massa; no entanto, podem causar consequências sérias quando combinados com sílica reativa ou carbonatos na matriz de concreto. Assim, os termos reatividade álcali-sílica (ASR) e reatividade álcali-carbonato (ACR) designam as reações deletérias que ocorrem entre agregados reativos e álcalis. Os cimentos com conteúdo alcalino superior a 0,9% são considerados como de alto teor alcalino. Além do próprio cimento Portland (OPC), uma das fontes mais comuns de álcalis são alguns materiais cimentícios suplementares (SCM), como cinzas volantes de carvão de alta calcinação ou cinzas de combustão de biomassa. A reação álcali-sílica (ASR) inicia na matriz de cimento, geralmente meses ou anos após a confecção da peça, levando à formação de um gel expansivo pela reação entre os álcalis solúveis (óxidos de potássio e de sódio) e a sílica (PARIS *et al.*, 2016).

As cinzas de bagaço de cana de açúcar (CBCA) apresentam partículas muito finas, principalmente quando utilizados processos de moagem e peneiramento, com diâmetros de 5 a 50  $\mu\text{m}$ , podendo ser classificadas como adição fíler. Estas partículas contribuem para um maior preenchimento dos vazios deixados pelos produtos de hidratação do cimento, melhorando a matriz cimentícia. Na adição, o efeito físico dos grãos finos permite um melhor empacotamento



com as partículas de cimento e reduzem a porosidade na zona de transição entre a pasta e o agregado. Podendo ocasionar melhora de propriedades do concreto como a trabalhabilidade, a densidade, a segregação, a permeabilidade, a capilaridade, a exsudação ou a tendência à fissuração (SILVA, 2005). No entanto, a adição de CBCA ao concreto demonstrou reduzir a trabalhabilidade sendo que, normalmente, é necessário o uso de uma mistura redutora de água para atingir uma trabalhabilidade comparável ao concreto de referência (RUKZON *et al.*, 2018).

### 3.3.1 Substituição de Cimento Portland por CBCA

Visando compor uma revisão sistemática sobre o efeito de substituições parciais de cimento Portland (OPC) por cinzas de bagaço de cana de açúcar (CBCA) foram pesquisados diversos artigos segundo os critérios de pesquisa, inclusão e exclusão listados na Tabela 2. Ao todo foram analisadas 131 dosagens, 32 materiais de 27 pesquisas. Foram encontrados 15 trabalhos que apresentaram a substituição de OPC por CBCA em argamassas, com 19 materiais. Para substituições em concreto, foram encontrados 12 trabalhos, analisando 13 materiais.

Tabela 2: Critérios de pesquisa - revisão sistemática sobre substituições parciais de OPC por CBCA

Critério de pesquisa	Critérios de inclusão	Critérios de exclusão
(1) Base de dados eletrônica consultada: Web of Science; (2) período de pesquisa 2001-2020; (3) palavras-chave utilizadas: sugarcane+bagasse+ash+concrete; sugarcane+bagasse+ash+mortar (4) somente artigos em inglês (5) texto integralmente disponível pelo portal de periódicos da CAPES	(1) o objeto do artigo foi a substituição parcial de cimento por CBCA para produção de concreto ou argamassa; (2) Consta a composição química da cinza por fluorescência de raios X, (3) Consta a composição granulométrica da cinza; (4) o traço do concreto (ou da argamassa) foi mantido constante e igual ao do concreto (ou da argamassa) de referência (exceto pela substituição parcial de cinza); (5) Apresenta os resultados de resistência mecânica por compressão axial após 28 dias de cura do concreto ou argamassa. (6) quando beneficiada, somente queima controlada, peneiramento e moagem foram empregados	(1) a relação a/c ou água aglomerante (no caso de substituições parciais de cimento por cinza) foi alterada nas substituições; (2) fração da cinza menor que 45µm foi inferior a 50%, (3) fração de óxidos de silício, alumínio e ferro menor que 60% das cinzas; (4) LOI > 20%; (5) substituição foi realizada considerando o volume; (6) adições (excluído plastificantes) foram utilizadas.

Quanto aos efeitos sobre a resistência, a substituição parcial de cimento Portland por cinzas em concretos e argamassas pode causar ganho ou de redução de resistência aos 28 dias, dependendo das características da cinza utilizada e da fração substituída. Considerando o ganho de resistência à compressão axial normalizado segundo a Equação 6, comparando diferentes

traços e cinzas empregadas na literatura, segundo os critérios de inclusão mencionados na Tabela 2, tem-se as Figuras 5 e 6. Nelas, a legenda é composta pelo material considerado (M+número) e a relação a/c (indicado após o traço). A correspondência entre os materiais e as referências estão indicados nas Tabela 1 e 2 do Anexo B, juntamente com os detalhes acerca das pesquisas.

$$G(\%) = 100 \times \frac{f_{cm28_{substituição}} - f_{cm28_{referência}}}{f_{cm28_{referência}}} \quad (6)$$

Em que:

G: ganho percentual de resistência obtido pela substituição de cimento por CBCA aos 28 dias;

$f_{cm28_{substituição}}$ : fcm aos 28 dias do concreto em que houve substituição parcial de cimento;

$f_{cm28_{referência}}$ : fcm aos 28 dias do concreto em que não houve substituição parcial de cimento;

Das Figuras 5 e 6 depreende-se que os ganhos em resistência tendem a decrescer com o aumento no teor de substituição. Pode-se perceber que há praticamente um consenso, a substituição de cimento pelas cinzas estudadas causa um efeito positivo para as resistências de concretos e argamassas quando o teor de substituição for 5%. Entre 10 e 15% de substituição os resultados sobre a resistência variam entre perdas de 10% à ganhos de 40% na resistência. Para substituições maiores que 20% do cimento, os trabalhos analisados indicaram efeitos negativos sobre a resistência. Deve-se, no entanto, notar que foram inclusos apenas trabalhos com cinzas finas, alto teor de óxidos de sílico, alumínio e ferro e baixos teores de LOI.

Para as cinzas oriundas de queima controlada empregadas em argamassas foi notada uma maior variabilidade dos resultados, sendo observados ganhos de resistência em aplicações com até 30% de substituição de cimento. De forma geral, verifica-se que a queima controlada das cinzas garantiu um desempenho similar ou superior ao das cinzas oriundas de queima industrial sem dispositivos de controle. A dispersão dos resultados indica que o tipo de controle da queima, temperatura máxima atingida, tempo de queima e tratamentos complementares como peneiramento e moagem influenciam de formas diferentes na resistência do produto obtido. O estudo que apresentou maiores possibilidades de ganho em resistência de argamassas foi o realizado por Wang *et al.*, (2016) (referente aos materiais M15-0,45, M15-0,55, M15-0,65, da Figura 5), nele a queima foi processada à 500°C por 3 horas, entretanto não foi informada a relação agregado/aglomerante empregada que possibilitou tais ganhos. Neste estudo, foi identificado que maiores relações água/cimento permitem maiores teores de substituição de

cimento por cinzas, sendo que o concreto com relação a/c de 0,6 e 20% de substituição o que apresentou maior ganho. Este fato pode ser decorrência da absorção de água que as cinzas promovem. Já a cinza de queima controlada que apresentou menores ganhos de resistência foi a utilizada na pesquisa de Pereira *et al.* (2018), foi realizada autocombustão por 24h, sem controle de temperatura, sendo a temperatura máxima registrada de 700°C.

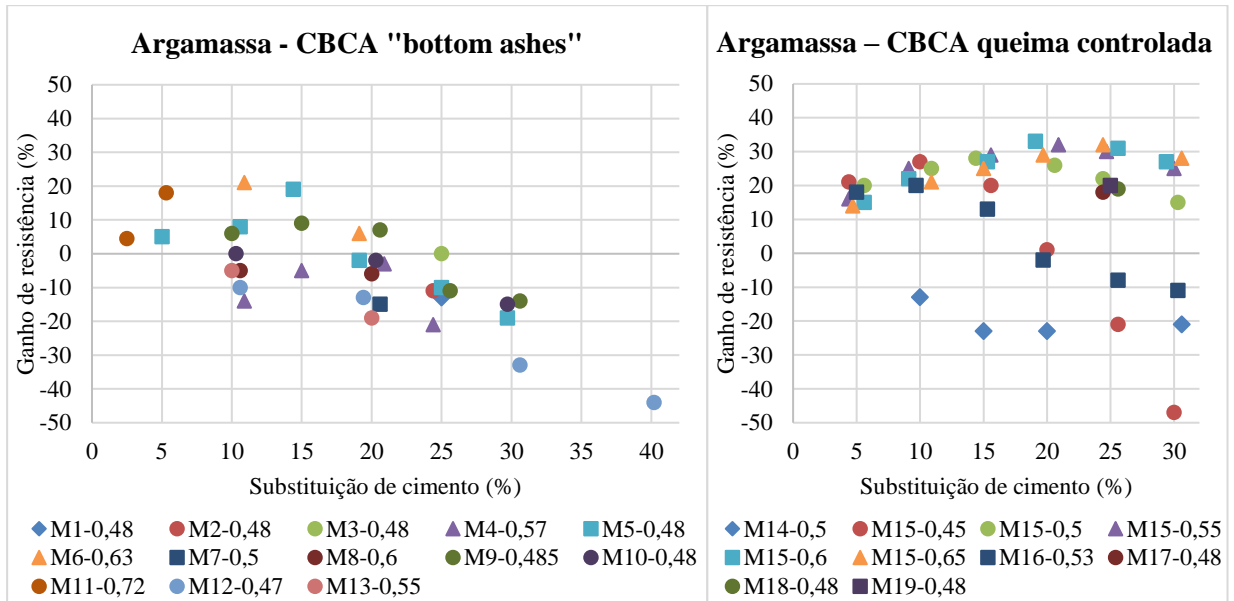


Figura 5: Ganho de resistência com a substituição de cimento por cinzas (CBCA) – argamassas (Gráfico elaborado a partir dos resultados dos autores listados nas Tabelas 2 e 3 do Anexo B)

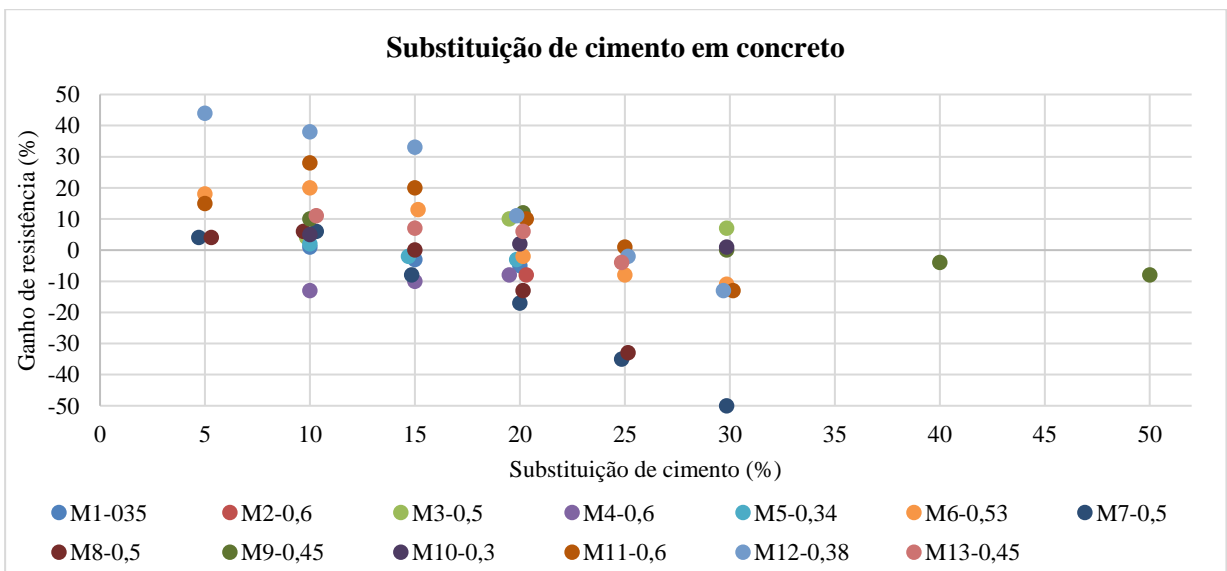


Figura 6: Ganho de resistência obtido pela substituição parcial de cimento por cinzas (CBCA) (Gráfico elaborado a partir dos resultados dos autores listados na Tabela 1 do Anexo B)

Arif *et al.* (2016) utilizaram CBCA bruta para substituir parcialmente o cimento na produção de argamassa (LOI: 7,15%, corrigindo a relação a/c), e encontraram, que as pastas cal-

CBCA e cimento-CBCA mostram pouca ou nenhuma atividade pozolânica, exceto quando empregados substituições de 5% de cimento, sendo este resultado determinado mediante a observação do consumo de portlandita em análises de ensaios de difrações de raios X. Quanto à substituição de cimento por CBCA em concretos Rerkpiboon *et al.* (2015) e Chusilp *et al.* (2009) registraram possibilidades de aplicação de teores de até 30% sem redução na resistência característica do concreto.

Quanto ao módulo de elasticidade, os concretos produzidos com substituições parciais de cimento por CBCA não apresentaram grandes alterações, estando os resultados situados entre 90 e 110% do valor obtido para o concreto de referência, conforme pode ser verificado na Tabela 3, a correspondência entre os materiais e as referências, assim como os dados complementares das pesquisas estão relacionados na Tabela 1 do Anexo B.

Tabela 3: Módulo de elasticidade em concretos com substituições de cimento por CBCA

Material de substituição	Variação do Módulo de Elasticidade (GPa)					
	0%	Teor de substituição de cimento por cinzas				
	0%	5%	10%	15%	20%	25%
M1-0,35	34,2	-	32,7 (-4%)	32,7 (-4%)	33,9 (-1%)	-
M4-0,6 CC-28	25,8	-	25,2 (-2%)	25,7 (-0,4%)	25,2 (-2%)	-
M4-0,6 CC-10	29,9	-	27,4 (-8%)	28,2 (-6%)	26,5 (-11%)	-
M4-0,34 HS-28	34,2	-	32,7 (-4%)	32,7 (-4%)	33,9 (-1%)	-
M4-0,34 HS-10	37,4	-	36,3 (-3%)	36,2 (-3%)	36,5 (-2%)	-
M5-0,6 CC-28	23,1	-	-	23,8 (+3%)	-	-
M5-0,34 HS-28	30,7	-	-	31,4 (+2%)	-	-
M11-0,6	19,6	21,1 (+8%)	22,2 (+13%)	21,4 (+9%)	20,6 (+5%)	19,8 (+1%)

Valor entre parênteses - aumento ou redução com relação ao concreto de referência

Com relação à durabilidade, há indícios de que a utilização de CBCA finas na substituição de cimento Portland gere produtos duráveis. Rukzon e Chindaprasirt (2011) e Ganesan *et al.* (2007), relataram pequenas alterações na taxa de absorção de água ao comparar concretos sem e com substituições de cinzas, sendo as taxas reportadas de valores inferiores à 10%. É possível observar, a partir da Figura 7 que há uma forte tendência de redução na passagem de carga elétrica por concretos que empregam substituições, indicando maior resistência ao ataque por cloretos. Sendo que, a redução é potencializada ao longo do tempo de cura, indicando que as reações entre as cinzas e os produtos das reações do cimento continuam a ocorrer de forma significativa se a cura for prolongada por mais de 28 dias. Adicionalmente, Chusilp *et al.* (2009) descrevem a redução na permeabilidade dos concretos que empregaram substituição de cimento por cinzas nos teores de 10, 20 e 30%, sendo a redução da permeabilidade crescente com o aumento do teor da substituição.

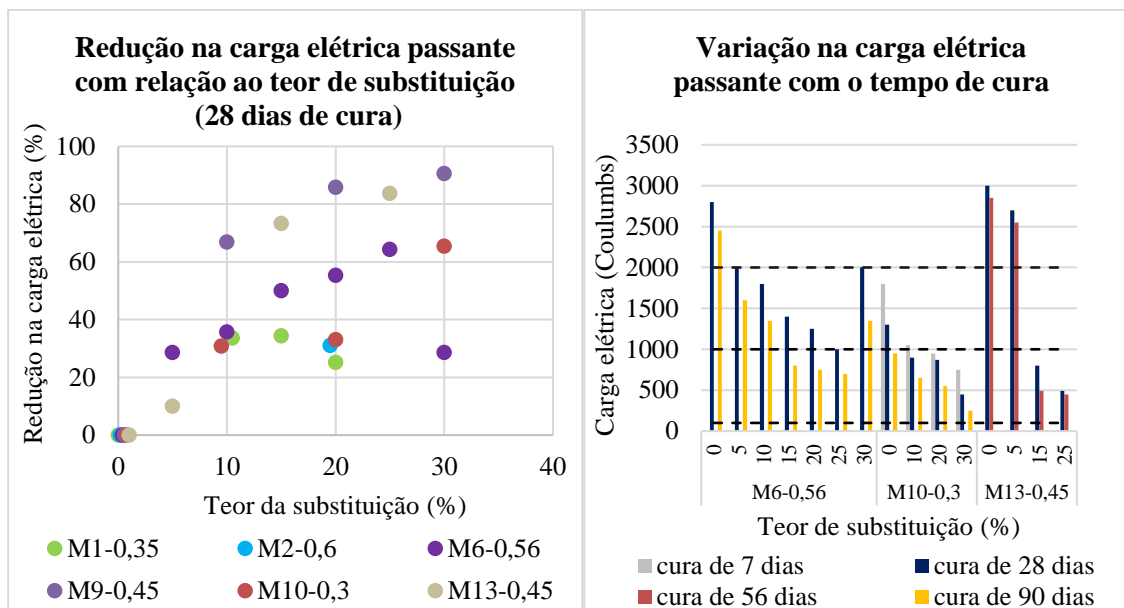


Figura 7: Redução na carga elétrica passante no concreto produzido com CBCA (Gráfico elaborado a partir dos resultados dos autores listados na Tabela 1 do Anexo B)

Embora a análise dos dados de pesquisas anteriores indique cenários positivos para a substituição parcial de cimento por cinzas de bagaço de cana em até 20%, é necessário que se estude o traço que se pretende aplicar e as características da cinza disponível.

### 3.3.2 Substituição de Areia por CBCA

A substituição de agregados miúdos por cinzas é menos estudada que a substituição parcial de cimento por CBCA. Isto se deve ao tamanho das partículas presentes da cinza normalmente estarem mais próximas ao tamanho das partículas de aglomerantes e ao potencial de ganho econômico e redução de emissões de carbono com a substituição do cimento ser maior. Entretanto, do ponto de vista da redução do volume de resíduos a ser disposto, a aplicação como substituinte da areia apresenta potencial vantajoso, além de reduzir a extração deste recurso, que traria impactos negativos ao meio ambiente.

A melhoria nas propriedades do concreto / argamassas produzidas com CBCA está relacionado principalmente ao efeito de preenchimento (filer), podendo ser associado também com o efeito de reações pozolânicas. Com a substituição, ocorre um refinamento dos poros, acarretando em efeitos benéficos, pois a estrutura porosa de um material impacta significativamente o transporte de agentes agressivos em materiais cimentícios (MORETTI *et al.*, 2018).

De acordo com IUPAC (2001), o tamanho dos poros pode ser categorizado como: microporos (<0,002 mm), mesoporos (entre 0,002 e 0,05 mm) e macroporos (>0,05 mm). Macroporos impactam de forma significativa as propriedades de permeabilidade e difusividade. Reduzindo o volume de grandes capilares (>0,1 mm) é possível reduzir a permeabilidade da matriz cimentícia. Segundo Moretti *et al.* (2018), a substituição de areia por SBAS mudou a distribuição do tamanho dos poros, sem, no entanto, afetar a porosidade das argamassas. Houve redução de macroporos nas argamassas que empregaram 30 e 50% de substituição, realizando as correções no teor água-cimento pela absorção extra acarretada pelo uso das cinzas.

Moretti *et al.* (2016) utilizaram cinzas de fundo das caldeiras para substituição de 30% da areia, a cinza foi peneirada (abertura da peneira: 4.8 mm) e moída por três minutos em moinho mecânico. A substituição praticamente não alterou a resistência mecânica (queda de 1,6%) e manteve o mesmo valor de absorção de água, entretanto o módulo de elasticidade foi reduzido em 4%. Porém, houve indicativos de que a baixa alcalinidade do concreto que empregou CBCA, contribuiu para a aceleração dos processos de carbonatação.

Sales e Lima (2010) relataram ganhos de resistência em argamassas produzidas com 20% e 30% de substituição. Similarmente, Almeida *et al.* (2015), utilizando cinzas peneiradas e moídas e baixo teor de material não queimado (LOI: 0,7%), constataram que as argamassas produzidas com 30% e 50% de SBAS apresentaram resistência similar à utilizada como referência e maior resistência à penetração de cloreto. Entretanto, Arif *et al.* (2016), encontraram maiores penetrações de cloreto, que poderia estar relacionadas ao emprego de superplastificantes.

### 3.3.3 *Uso de Adições e Aditivos em Concretos que empregam CBCA*

Os aditivos são como produtos adicionados ao concreto em pequenas quantidades com finalidade de modificar algumas de suas propriedades, no sentido de adequar as características do concreto aos usos pretendidos. Os aditivos mais utilizados visam retardar ou acelerar o tempo de pega, reduzir a exsudação e a segregação, retardar a taxa de evolução do calor de hidratação, acelerar a velocidade de desenvolvimento da resistência nas primeiras idades, aumentar a plasticidade do concreto sem aumentar a quantidade de água empregada e aumentar a durabilidade em determinadas condições específicas de exposição (CONDÉ, 2016). No presente trabalho foram utilizados dois aditivos superplastificantes e um cristalizante.

### 2.3.3.1. Superplastificantes

Adições de redutores de água no concreto melhoram suas propriedades frescas e endurecidas. As características de um superplastificante como a estrutura química, os grupos funcionais presentes e sua dosagem possuem considerável influência sobre as propriedades de fluxo da pasta de cimento. Diferentes famílias químicas de superplastificantes são usados em concretos para alcançar fluidez necessária. Concretos que empregam combinações de materiais cimentícios, necessitam de estudos sobre a interação entre diferentes superplastificantes e materiais empregados. A seleção imprópria de superplastificantes incompatíveis com os materiais empregados no concreto levam a efeitos adversos sobre o produto fresco e endurecido, como: segregação, pega atrasada, perda de trabalhabilidade e exsudação excessiva (BERENGER *et al.*, 2014).

Concretos que empregam materiais cimentícios suplementares, normalmente utilizam maiores quantidades de superplastificante que concretos convencionais. O mesmo ocorre com as adições e as substituições de cinzas de bagaço de cana-de-açúcar, uma vez que ocasionam perdas de fluidez e trabalhabilidade. No entanto, a interação de diferentes superplastificantes com cinza de bagaço de cana ainda são pouco estudadas (BERENGER *et al.*, 2014).

Para que se alcance boa trabalhabilidade com menores relações água cimento, diferentes tipos de superplastificantes podem ser empregados. Superplastificantes à base de naftaleno formaldeído sulfonado (SNF), sulfonados à base de melamina formaldeído (SMF) e superplastificantes policarboxilatos à base de éter (PCE) são geralmente usados em aplicações de concreto por seu desempenho superior em comparação com misturas à base de lignosulfato, que apresentam problemas de retardo na pega excessiva e desempenho inconsistente (BERENGER *et al.*, 2014).

O desempenho de materiais cimentícios que empregam CBCA muda significativamente com o tipo de superplastificante. De acordo com Berenger *et al.* (2014) a incorporação de cinzas de bagaço de cana-de-açúcar (CBCA) influenciou fortemente a saturação dosagem de superplastificante, de forma que a dosagem de saturação foi aumentada com o aumento na substituição de CBCA. Isso se deu como uma consequência de estrutura irregular das partículas de cinza do bagaço.

Em argamassas produzidas com substituições de CBCA, a dosagem de saturação para o superplastificante à base de naftaleno sulfonado (SNF) é sensivelmente maior que para o

superplastificante à base de policarboxilatos (PCE). Isto ocorre devido ao mecanismo de ação do produto: enquanto superplastificantes SNF trabalham principalmente com a redução do potencial zeta e repulsão eletrostática, o principal mecanismo de ação dos superplastificantes PCE é a formação de obstáculo estérico, devido às cadeias laterais volumosas em suas moléculas. Isso causa uma dispersão mais eficaz em comparação ao SNF. O trabalho indica maior compatibilidade de concretos com adições de cinzas com superplastificantes à base de policarboxilatos (BERENGER *et al.*, 2014).

Ainda segundo Berenger *et al.* (2014), para que se obtenha uma melhor trabalhabilidade, as partículas fibrosas precisam ser removidas da cinza bruta do bagaço. Removendo tais partículas e moendo a cinza resultante, foi possível reduzir o consumo de água na argamassa em 20% para que se obtivesse o mesmo espalhamento no ensaio de índice de atividade pozolânica, aumentando o índice de atividade pozolânica de 72 para 102%.

#### 2.3.3.2 Catalizadores Cristalinos

Os compostos químicos do aditivo cristalizante, em especial as substâncias à base de silicato, reagem com a água, hidróxido de cálcio e alumínio, demais óxidos e alguns sais presentes no concreto. Como resultado, ocorre o crescimento de cristais no interior dos poros capilares podendo, inclusive, selar possíveis fissuras (POLESELLO e MAUS, 2020).

Com a utilização das cinzas, é esperado que parte da água da pasta de cimento seja absorvida pelas partículas de CBCA (BERENGUER *et al.*, 2014), o que pode resultar em uma microestrutura mais porosa, principalmente nas dosagens que empregam maiores percentuais de substituição. O aumento na porosidade pode acarretar em perdas de resistência e redução na durabilidade (CONDÉ, 2016). Os catalizadores cristalinos propiciam a formação de cristais, densificando a microestrutura do concreto, impedindo a entrada de água, sem, no entanto, impossibilitar a passagem do vapor d'água, evitando a pressão de vapor dentro do concreto. Por ser parte do concreto resultante, estes aditivos trazem maiores resistências ao intemperismo, uma vez que não formam películas, diferentemente de quando aplicados sobre a superfície de concreto (POLESELLO e MAUS, 2020).

Nasin *et al.* (2001), verificaram a capacidade do aditivo cristalizante de recuperar a resistência com o fechamento de poros e fissuras em concreto, registrando um ganho na resistência à compressão de 36,6%, após 42 dias, ao utilizar o aditivo cristalizante em comparação ao concreto referência, quando fissuras foram induzidas nos concretos aos 3 dias de



idade. Porém, em concretos não fissurados, de acordo com Moreira *et al.* (2016), aditivos redutores de permeabilidade por cristalização, podem não alterar a resistência quando empregado a/c igual a 0,45 e adição de 0,8% com relação à massa de cimento. Pelos resultados obtidos por Polesello e Maus (2020), verificou-se que a relação a/c, o teor de aditivo, o tipo de cura, exercem influência significativa sobre a resistência à compressão do concreto aos 28 dias de idade. Para relação a/c, igual a 0,45, houve uma perda de resistência com o aumento da adição de cristalizante ao concreto, permanecendo praticamente estável entre 0,8% e 1,0%, porém, para relações a/c maiores, o comportamento mostrou-se contrário.

O cristalizante pode promover um melhor fechamento dos poros pelo processo de cristalização, que ocorre gradativamente ao longo do tempo, proporcionando melhor comportamento em relação à durabilidade do concreto. Entretanto, Cappellesso (2016) observou um aumento na absorção de água no concreto produzido com adição do aditivo cristalizante, para dosagem de 0,8%. O aditivo mostrou-se capaz de modificar a distribuição e o tamanho dos poros, podendo aumentar a higroscopicidade do material. O mesmo efeito foi observado por Nascimento *et al.* (2017), ao utilizar uma dosagem de 1,0%.

#### 3.3.4 Durabilidade

Além da resistência mecânica, deve-se avaliar critérios técnicos, econômicos e sociais implicados na utilização dos materiais como durabilidade, desempenho, vida útil, ciclo de vida, e custos associados, para garantir a sustentabilidade. Os custos de manutenção e recuperação de obras de concreto têm grande impacto no custo do ciclo de vida e na geração de resíduos, estes fatores associados à um mercado consumidor a cada dia mais exigente, justificam o desenvolvimento de materiais mais duráveis (CONDÉ, 2016; SILVA, 2005).

A durabilidade não é uma propriedade intrínseca dos materiais, mas uma função relacionada com os seus desempenhos sob determinadas condições ambientais. Produzindo materiais mais resistentes e duráveis evita-se a exploração de recursos materiais, ao reduzir a necessidade de reparos, manutenções e reconstruções, preservando a natureza; pois a durabilidade se relaciona à capacidade do concreto de resistir à ação de intempéries, ataques físicos e químicos, mantendo assim suas características originais e desempenhando satisfatoriamente a função ao qual foi designado (CONDÉ, 2016; SILVA, 2005).

Alguns dos efeitos físicos que influenciam negativamente a durabilidade do concreto são o desgaste superficial, a fissuração causada por pressão de cristalização de sais em poros,

exposição às variações drásticas de temperatura e às temperaturas extremas. Dentre os efeitos químicos, destacam-se a lixiviação da pasta de cimento por soluções ácidas, reações expansivas envolvendo o sulfato, reações álcali-agregado e corrosão das armaduras (CONDÉ, 2016; SILVA, 2005).

A água é considerada o agente primário para a maioria dos problemas de durabilidade do concreto, servindo de veículo para o transporte de íons agressivos através da estrutura porosa do concreto. A existência de poros e sua distribuição no concreto aumentam sua capacidade de absorção e a interconexão dos vazios no concreto o torna permeável à água. A absorção é o processo físico pelo qual o concreto retém água nos poros e condutos capilares. Já a permeabilidade é a propriedade que identifica a possibilidade de passagem da água através do material. Enquanto que a porosidade se refere à quantidade total de vazios e a absorção está em função dos poros que tem comunicação com o exterior (SILVA, 2005).

O sistema de poros na pasta de cimento endurecida é fator importante quando se avalia o mecanismo de despassivação por carbonatação. Nele o gás carbônico atmosférico penetra por difusão reagindo com os hidróxidos alcalinos da solução dos poros do concreto, reduzindo o pH dessa solução. A distribuição dos poros influencia no mecanismo pois a célula eletroquímica estabelecida no concreto armado necessita de uma conexão entre o ânodo e o cátodo para estabelecer a corrosão do aço. Já a despassivação por elevado teor de cloreto ocorre através da penetração do cloreto por processos de difusão, de impregnação ou de absorção capilar de águas contendo teores deste íon, despassivando a superfície do aço e instalando a corrosão (CONDÉ, 2016; NEVILLE, 1997; SILVA, 2005).

A alcalinidade do concreto é característica vantajosa para a proteção das armaduras. O concreto atua como um inibidor anódico, ao ocasionar uma deposição de óxido de ferro sobre o aço, dificultando a difusão do oxigênio e impedindo reações catódicas que levariam à corrosão (CONDÉ, 2016; SILVA, 2005).

A lixiviação é causada por águas puras e carbônicas agressivas e ácidas, que dissolvem e carreiam os compostos hidratados da pasta de cimento, tornando a superfície do concreto arenosa, expondo os agregados sem a pasta superficial, podendo ocorrer eflorescências de carbonato, elevada retenção de fuligem e risco de desenvolvimento de fungos, com conseqüente redução do pH do extrato aquoso dos poros superficiais (SILVA, 2005).

A ação física da pozolana e de filers melhoram a densidade, e a homogeneidade da pasta de cimento. Cinzas de bagaço de cana-de-açúcar, por conter partículas mais finas que o cimento Portland, causam a segmentação dos poros grandes e aumenta o número de regiões onde ocorre a nucleação para a precipitação dos produtos de hidratação, acelerando as reações e formando menos cristais de hidróxido de cálcio (CH). A ação química dos materiais com propriedades pozolânicas aumentam o efeito físico por causa da alta segmentação dos poros e o refinamento dos grãos de CH durante o processo de cura. A importância dos poros não intercomunicáveis está relacionada com a não penetração do  $\text{CO}_2$  e dos íons cloreto, permitindo materiais cimentícios duráveis frente a estes agentes agressivos (SILVA, 2005).

## 4 MATERIAIS E MÉTODOS

A pesquisa foi realizada em três fases, conforme ilustra a Figura 8.

Na primeira fase foram escolhidos e caracterizados os materiais a serem utilizados para a produção do concreto, de forma a verificar se atendiam as especificações normativas. No caso das cinzas, foram estabelecidos os pontos de coleta e análises quanto à possibilidade de uso segundo a granulometria, reatividade, microscopia e massa específica.

Na segunda fase foi avaliada a possibilidade de uso das cinzas como material de substituição parcial de cimento e de agregado miúdo. Para isso, foi mantida uma mesma dosagem de concreto realizando apenas a substituição do material em 5%. Desta maneira, foi possível determinar a substituição mais vantajosa.

Na terceira fase foi avaliada a replicabilidade dos resultados, foi mantida a dosagem empregada na segunda fase, porém foi alterado o superplastificante utilizado. Nesta fase, foi possível determinar o teor de substituição que resulta em utilização otimizada das cinzas.

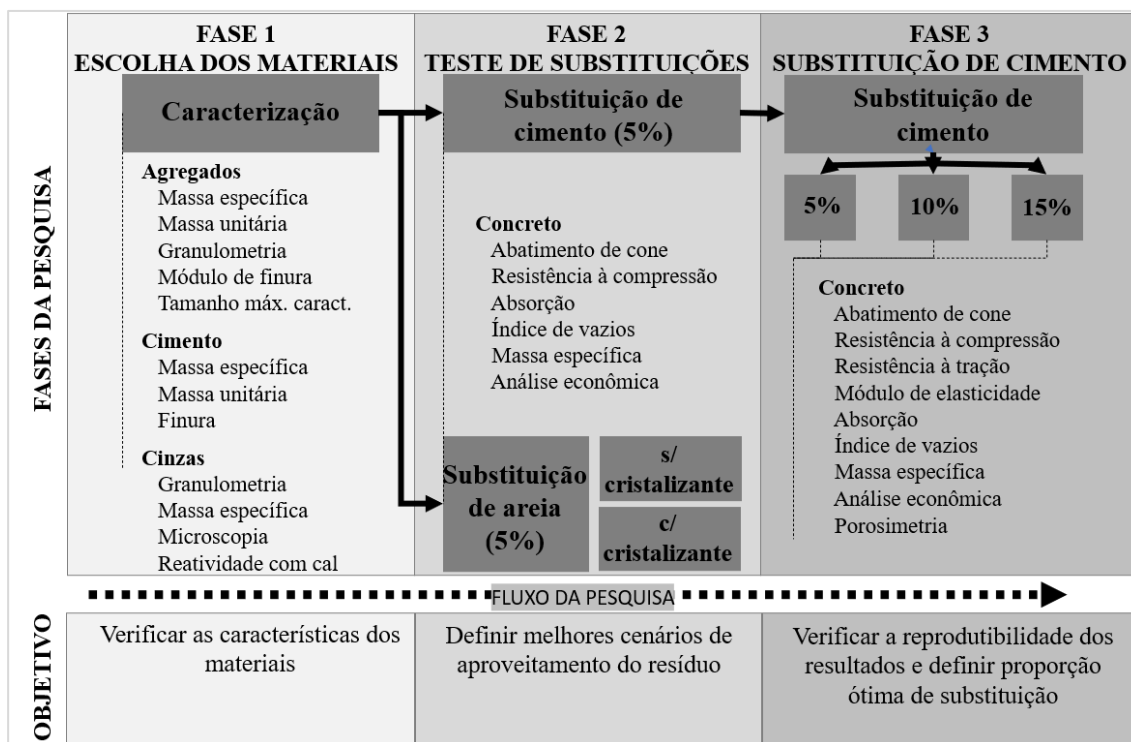


Figura 8: Etapas da pesquisa  
(Fonte: o próprio autor)

## 4.1 Materiais

No trabalho foram utilizados como agregados os materiais oriundos da região de Belo Horizonte - MG: areia quartzosa média lavada e brita de gnaiss n° 1.

Como aglomerante, foi utilizado o cimento CP II – E 32, este tipo de cimento é composto por 59-94% de clínquer, 6-34% de escória e 0-10% de materiais carbonáticos. Os cimentos com a presença de cinza volante e escória de alto-forno permitem maior proteção ao concreto, pois apresentam um melhor refinamento dos poros e elevados teores de C3A, que possui a capacidade de fixação dos íons livres de cloreto no concreto, sendo o CP-II E e o CP-IV os mais indicados para reduzir o ingresso de cloreto no concreto (CONDÉ, 2016).

Foram utilizados como aditivos os redutores de água tipo 2 ADVA® FLOW 880 (RA-2 em conformância com a ABNT NBR 11768-1:2019) e ADIMENT PREMIUM (fornecido pela Vedacit), que são aditivos superplastificantes à base policarboxilatos isentos de cloretos, e o aditivo cristalizante Xypex Admix C-500NF (fornecido pela MC-Bauchemie).

A utilização do plastificante (reduzidor de água) tem por objetivo proporcionar alta redução na demanda de água que as substituições por cinzas causam, tornar o concreto mais trabalhável, evitando a segregação e melhorando a coesão. Nas dosagens testadas, foi utilizado 2% sobre a massa de cimento.

O Xypex Admix C-500NF, quando aplicado no concreto reage com os subprodutos da reação de hidratação do cimento causando uma reação catalítica, gerando cristais insolúveis nos poros e capilaridades do concreto, dificultando a penetração da água e substâncias agressivas. São indicadas as adições nas proporções: 1 a 2% sobre a massa de cimento para impermeabilidade, 0,8% para aumento de durabilidade e 0,5% para inibição de expansão por sulfatos. No trabalho foi utilizada a dosagem de 0,8% sobre a massa de cimento.

As cinzas de bagaço de cana de açúcar foram cedidas pela Adecoagro e coletadas na Usina Monte Alegre, em Monte Belo Minas Gerais (cerca de 390km da capital Belo Horizonte e 360km de São Paulo-SP), no dia 20 de novembro de 2020. As cinzas geradas na caldeira eram utilizadas como material de aterro em obras da própria usina até o ano de 2019. A partir de então, por não haver obras próximas às caldeiras, as cinzas passaram a ser dispostas em pilhas próximas à pista do aeroporto da usina, que fica às margens da BR-491. Parte das cinzas atualmente é utilizada para cobrir os materiais em decomposição das leiras de compostagem, entretanto um

grande volume de material sobra e se acumula a cada safra. O material utilizado nesta pesquisa ainda não havia sido testado quanto à possibilidade de uso em concreto.

Foram coletadas cinzas de 14 pontos na área de disposição, sendo a cinza de 13 pontos coletada para análise de variabilidade do material, e do ponto com o descarte de cinzas mais recente foi coletado o material para que se fizesse o estudo das substituições de materiais no concreto. O material CTC foi disposto no dia 19 de novembro de 2020, tendo sido coletado no dia seguinte, juntamente com os materiais CAV.

Após a coleta, as cinzas foram secas ao sol até que se atingisse o teor de umidade de  $5\pm 2\%$ , posteriormente foram peneiradas de forma que só fosse utilizada nos ensaios a fração das cinzas cujas partículas apresentassem tamanho máximo de 1mm. As cinzas foram acondicionadas em sacos de polipropileno lacrados para evitar trocas de umidade até o momento de seu uso.

A Figura 9 apresenta a localização geográfica da área de descarte e os locais de coleta de material, já a Figura 10 apresenta as fotos do material nos pontos de coleta e a Tabela 4 apresenta as características visuais das cinzas e de tempo de disposição das cinzas coletadas.

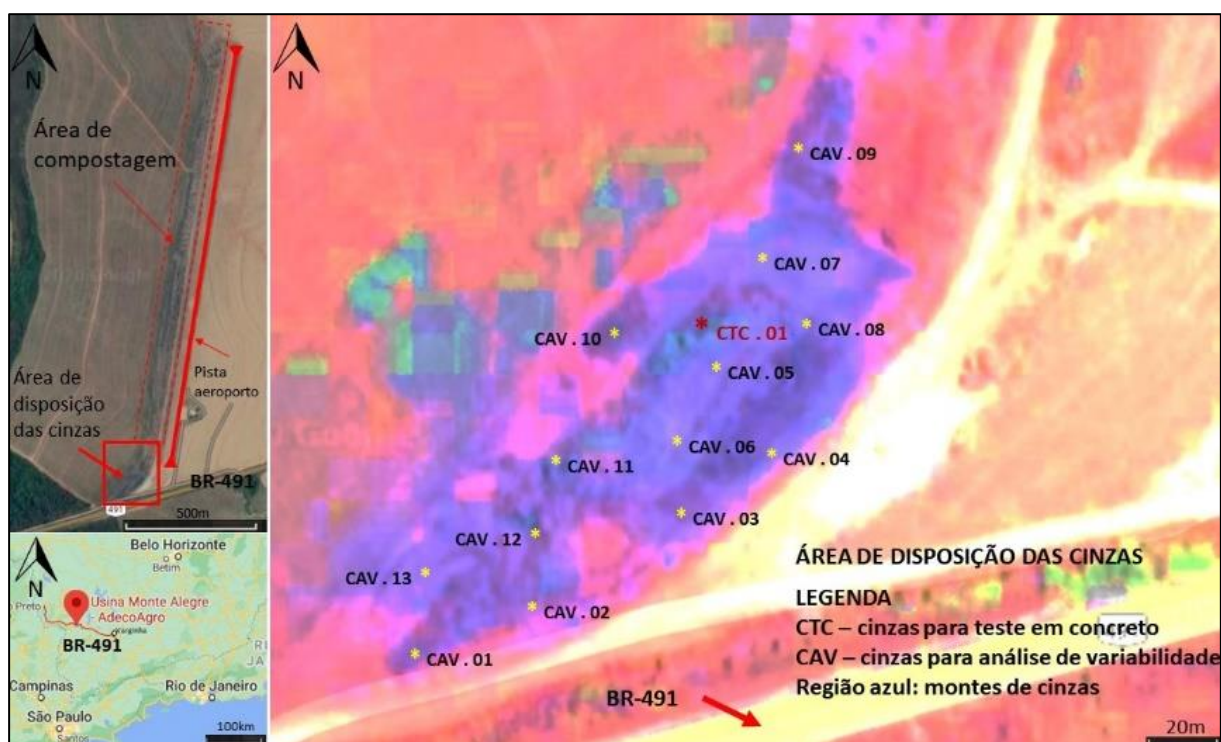


Figura 9: Localização da área de disposição das cinzas e dos pontos de coleta  
(Fonte: o próprio autor)

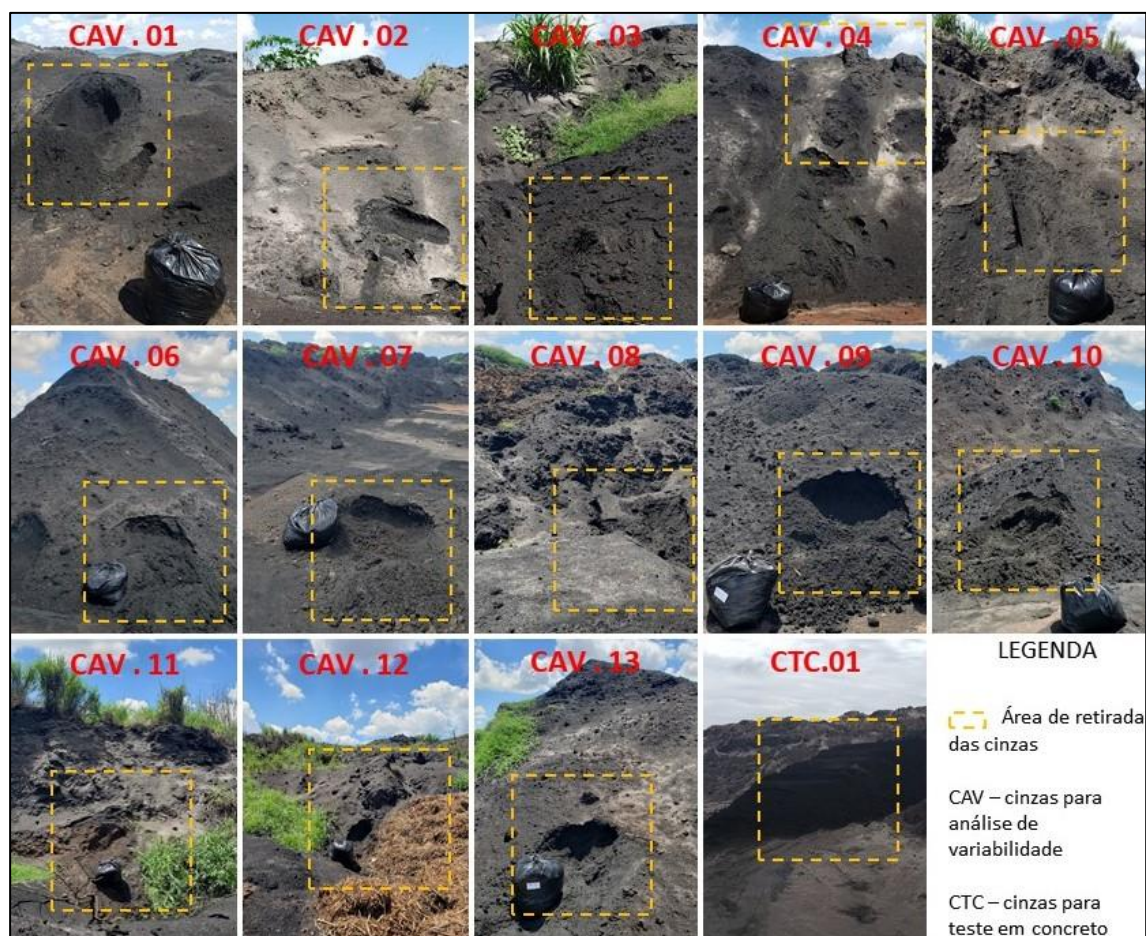


Figura 10: Fotos dos pontos de coleta de cinzas  
(Fonte: o próprio autor)

Tabela 4: Descrição das cinzas coletadas

Identificação	Tempo de disposição	Área de coleta na pilha	Observação
CAV.01	Cinzas antigas	Topo	
CAV.02	Cinzas antigas	Base	Aspecto superficial do local de coleta esbranquiçado
CAV.03	Cinzas recentes	Base	
CAV.04	Cinzas antigas	Topo	Aspecto superficial do local de coleta esbranquiçado
CAV.05	Cinzas recentes	Base	
CAV.06	Cinzas recentes	Base	Aspecto superficial do local de coleta esbranquiçado
CAV.07	Cinzas recentes	Base	
CAV.08	Cinzas antigas	Base	
CAV.09	Cinzas recentes	Base	
CAV.10	Cinzas recentes	Base	
CAV.11	Cinzas antigas	Base	Possível contaminação com solo
CAV.12	Cinzas antigas	Base	
CAV.13	Cinzas antigas	Base	Aspecto superficial do local de coleta esbranquiçado
CTC.01	Cinzas recentes	Toda a altura	Recém disposta (coleta no mesmo dia da disposição)
Cinzas antigas – dispostas há mais de seis meses			Cinzas recentes – dispostas há menos de seis meses

## 4.2 Caracterização dos Materiais

Os métodos adotados para a caracterização dos agregados e do cimento seguem listados na Tabela 5. Enquanto que os métodos de caracterização das cinzas estão apresentados na Tabela 6.

Tabela 5: Métodos utilizados na caracterização dos agregados e aglomerante

Material	Ensaio	Método
Agregados (Areia e Brita)	Granulometria	ABNT NBR NM 248: 2003
	Massa unitária	ABNT NBR NM 45: 2006
	Massa específica	ABNT NBR NM 52: 2003
	Módulo de finura	ABNT NBR NM 248: 2003
	Tamanho máximo característico	ABNT NBR NM 248: 2003
Cimento	Massa unitária	ABNT NBR NM 45: 2006
	Massa específica	ABNT NBR NM 23: 2000
	Finura (método de Blaine)	ABNT NBR NM 76: 1998
	Finura (peneira 75 $\mu$ m)	ABNT NBR 11579: 2012

Tabela 6: Métodos utilizados na caracterização das cinzas de bagaço de cana

Cinza	Ensaio	Método
CTC	Granulometria	ABNT NBR NM 248: 2003
	Massa específica	ABNT NBR NM 23: 2000
	Microscopia	Pinometria He
	Reatividade com cal CH-I	Especificação do equipamento PAYA <i>et al.</i> , 2001 – adaptado
CAV	Peneiramento	Peneira de abertura 1mm

## 4.3 Produção e Caracterização do Concreto

O concreto abordado neste trabalho foi dosado a partir de resultados obtidos em pesquisas realizadas na Escola de Engenharia da UFMG, levando em consideração o método de dosagem do ACI – American Concrete Institute e a norma NBR 6118 (2014). O estudo de dosagem partiu da definição da classe do concreto, da relação água/cimento e das condições de agressividade. Foram produzidos concretos com resistência à compressão de 25 MPa, relação água/cimento de 0,50 e uso de 2% de aditivo superplastificante (com relação à massa de cimento). Para a dosagem do concreto, a correção na quantidade de água pela umidade da areia foi realizada pelo método do frasco de Chapman. A homogeneidade do concreto foi obtida através do processo de mistura de seus constituintes, utilizando-se uma betoneira durante um período que variou de três a cinco minutos. A ordem de mistura foi: metade da brita, areia, cinzas, metade da brita, cimento, água e plastificante. Quando utilizado o cristalizante, este foi colocado antes da adição de água.



Na segunda fase da pesquisa, foi realizado um estudo para avaliar o desempenho do concreto quando utilizadas cinzas para substituição parcial de cimento Portland e para a substituição de agregado miúdo. A partir dos resultados obtidos, obteve-se um maior potencial para aplicação das cinzas como substituição parcial de cimento Portland. Para verificar a replicabilidade dos resultados e avaliar a fração ideal de substituição de cimento, foram realizados novos ensaios considerando substituições de 5, 10 e 15% em massa, constituindo estes ensaios uma terceira fase da pesquisa. As quantidades de materiais utilizadas para a produção de 1m<sup>3</sup> de concreto estão apresentadas na Tabela 7. Na Fase 2 foi utilizado o redutor de água ADVA® FLOW 880, enquanto que na fase seguinte foi empregado o ADMENT PREMIUM.

Tabela 7: Consumo de materiais para a produção de 1m<sup>3</sup> de concreto

Fase do estudo	Dosagem	Cimento (kg)	Cinzas (kg)	Areia (kg)	Brita (kg)	Plast.	Crist.	a/c
Fase 2	Referência	370	-	740	1110	2% <sup>1</sup>	-	0,5
	1	351,5	18,5	740	1110	2% <sup>1</sup>	-	0,5
	2	370	37	703	1110	2% <sup>1</sup>	-	0,5
	3	370	37	703	1110	2% <sup>1</sup>	0,8% <sup>1</sup>	0,5
Fase 3	Referência	370	-	740	1110	2% <sup>1</sup>	-	0,5
	5	351,5	18,5	740	1110	2% <sup>1</sup>	-	0,5
	10	333	37	740	1110	2% <sup>1</sup>	-	0,5
	15	314,5	55,5	740	1110	2% <sup>1</sup>	-	0,5

<sup>1</sup>porcentagem com relação à massa de cimento

Foi realizado o teste de abatimento de tronco de cone de acordo com ABNT NBR 16889:2020. Foram moldados corpos de prova de 10 centímetros de diâmetro por 20 cm de altura segundo a ABNT NBR 5738:2016. Após a cura submersa de 28 dias, foram realizados ensaios de compressão com incremento constante de tensão de acordo com a ABNT NBR 5739:2018, tendo sido determinados também a taxa de absorção de água segundo a ABNT NBR 9778:2009. A significância estatística dos parâmetros analisados foi avaliada usando análises de variância unicaudal (ANOVA) com nível de confiança de 95%. A hipótese nula foi associada com o valor de probabilidade (valor p)  $p > 0,05$ , significando que o concreto avaliado apresentou parâmetro de mesmo valor que o concreto convencional. Nos corpos de prova que avaliaram as substituições de cimento por CBCA, foram realizados ensaios de determinação de módulo de elasticidade (ABNT NBR 8522:2017).

A densidade do concreto seco foi determinada por um picnômetro de gás hélio (Multi Pycnometer – Quantachrome). As amostras foram retiradas por perfurações em três corpos de prova de cada dosagem segundo o método indicado na Figura 11. O material pulverizado obtido foi misturado, quarteado para que se procedessem os ensaios.

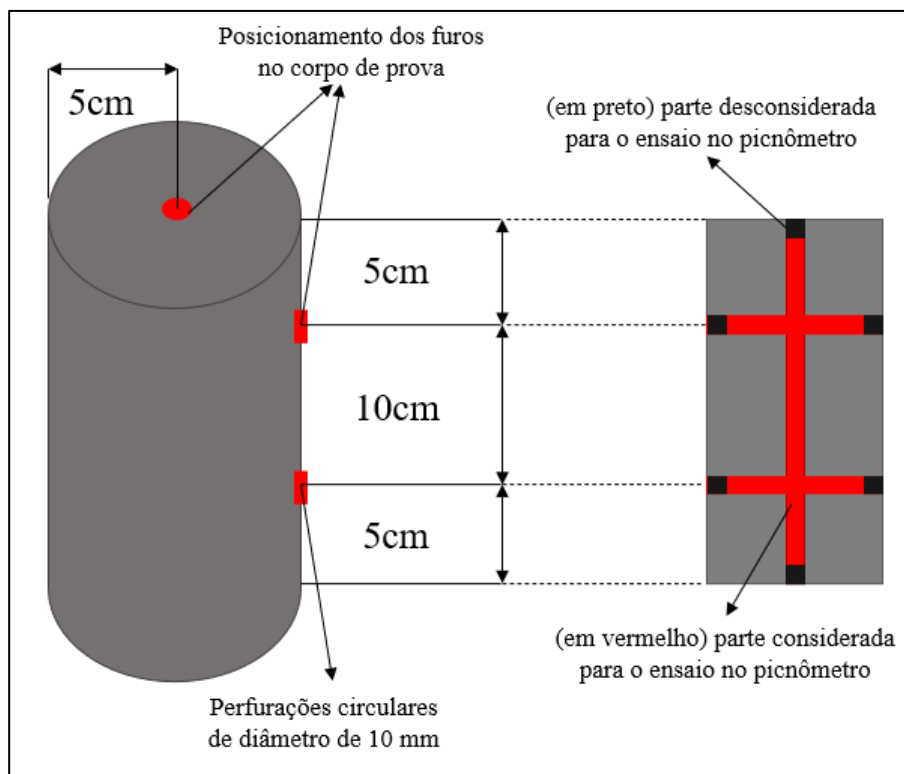


Figura 11: Desenho esquemático – coleta de material para análise no picnômetro  
(Fonte: o próprio autor)

#### 4.4 Análises Econômicas

Foi produzida uma análise acerca da viabilidade econômica da utilização de substituições parciais de cimento Portland e areia por cinzas de bagaço de cana-de-açúcar. Para isso, foram utilizados os preços médios para os insumos de construção civil no mês de fevereiro de 2021 para o município de Belo Horizonte (SINAPI, 2021), considerando os materiais utilizados nos concretos produzidos para este trabalho.

Elaborou-se uma análise simplificada acerca do ganho econômico possível de acordo com distância entre o ponto de produção e consumo das cinzas, com base na Resolução N° 5.923, de 18 de janeiro de 2021 (BRASIL, 2021) que estabelece valores de frete mínimo. Para tal, o cálculo baseou-se no transporte realizado por veículos de 4, 5, 7 e 9 eixos, levando em consideração somente o preço do transporte (ida e volta do veículo), carregamento e descarregamento. Não foram incluídos os custos com pedágios, tributações, lucro e custos com a administração das operações.

No primeiro cenário, considerou-se o consumo de um mesmo volume de concreto convencional e de concreto que utiliza as cinzas. Posteriormente, foi verificado que o uso de

cinzas altera a resistência do concreto, permitindo o redimensionamento da peça estrutural, implicando em consumo de diferentes volumes de concreto. Assim, a viabilidade econômica pode ser potencializada, caso a utilização de cinzas promova aumento de resistência do concreto, e é reduzida, caso as peças necessitem áreas de seção transversal maiores, devido a perda de resistência. Para o cálculo, foi dimensionado um elemento estrutural prismático, observando a resistência à compressão, de forma que se obteve uma equação para avaliação do potencial de ganho econômico sobre a redução de consumo do material substituído.

## 5 RESULTADOS

### 5.1 Primeira Fase

#### 5.1.1 Caracterização dos materiais

Os resultados obtidos na caracterização dos agregados e do cimento seguem na Tabela 8.

Tabela 8: Características dos agregados e cimento utilizados

Agregado	Massa unitária (10 <sup>3</sup> kg/m <sup>3</sup> )	Massa específica (10 <sup>3</sup> kg/m <sup>3</sup> )	Finura		Dimensão máxima característico (mm)
Areia média lavada	1,29	2,50	2,42 <sup>1</sup>		4,8
Brita de Gnaiss	1,47	2,62	7,20 <sup>1</sup>		25,0
CP II-E-32	1,10	3,10	310,0 <sup>2</sup>	2,5 <sup>3</sup>	-

<sup>1</sup> Módulo de finura; <sup>2</sup> Finura pelo método de Blaine; <sup>3</sup> Finura (%) peneira 75µm

O cimento apresentou resistência à compressão aos 28 dias superior à 32MPa seguindo a ABNT NBR 7215:2019.

#### 5.1.2 Caracterização das cinzas

As cinzas utilizadas (CTC) foram caracterizadas quanto à granulometria por peneiramento, a curva granulométrica está apresentada na Figura 12, que apresenta também as curvas granulométricas dos agregados utilizados. Ambos agregados cumpriram com os requerimentos estabelecidos pela ABNT NBR 7211:2019, a areia e a brita utilizadas encontram-se dentro da zona utilizável, estando a areia próxima à zona ótima. Já as cinzas possuem granulometria intermediária entre o agregado miúdo e o cimento. Foram notadas diferenças visuais nas cinzas em cada fração granulométrica, que podem ser visualizadas na Figura 13.

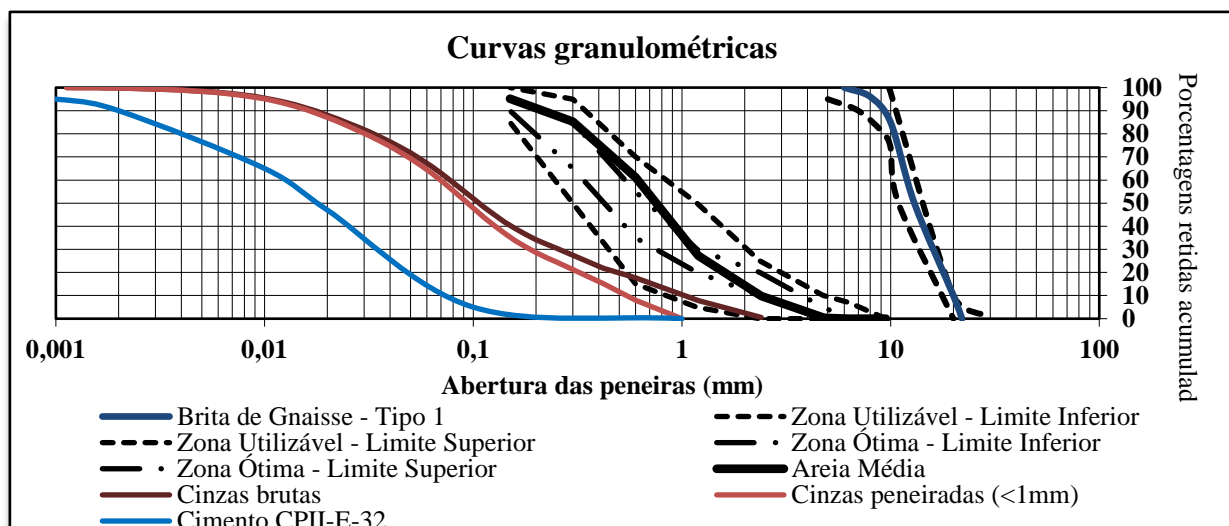


Figura 12: Curva granulométrica da cinza bruta e agregados - peneiramento  
(Fonte: o próprio autor)

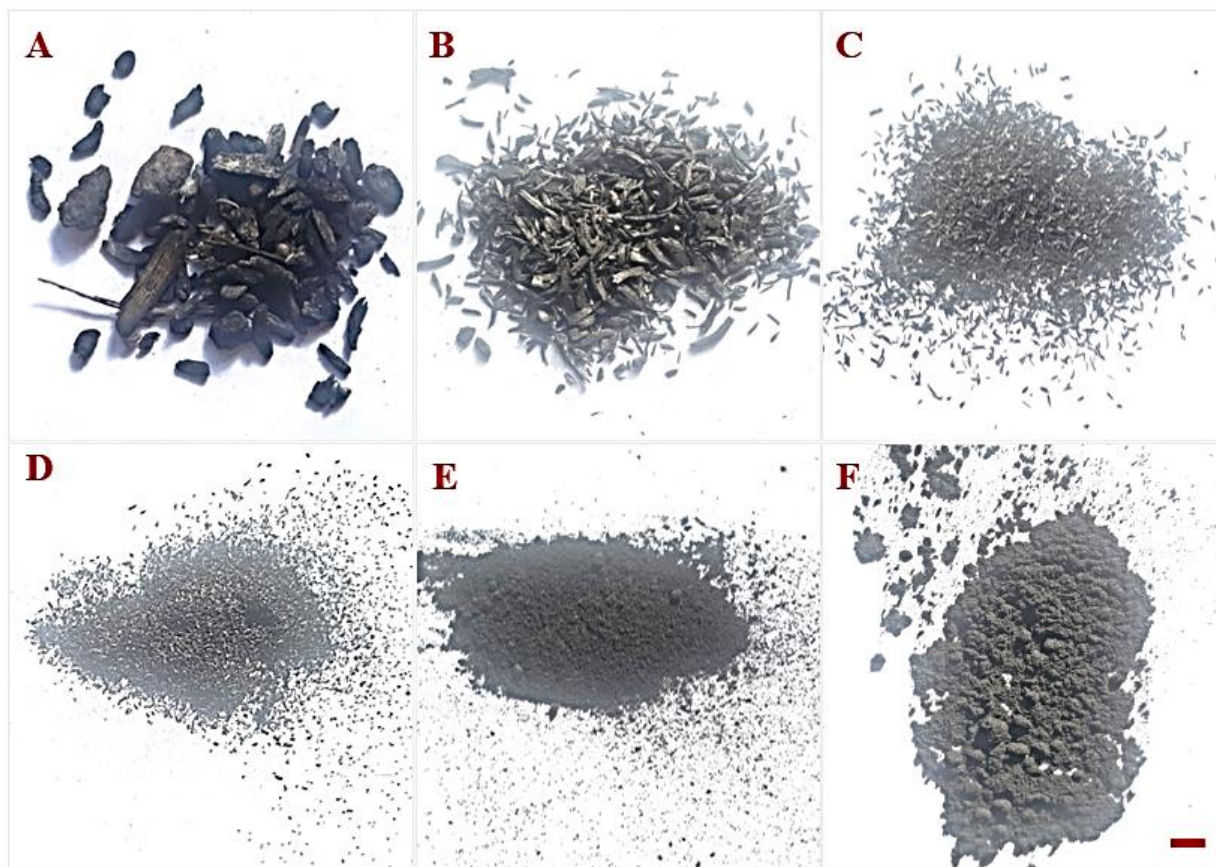


Figura 13: Frações granulométricas  
 A - retido na peneira 2,3 e 4,75mm; B - retido na peneira 1,18mm; C - retido na peneira 0,6mm;  
 D - retido na peneira 0,30mm; E - retido na peneira 75 $\mu$ m; F - passante na peneira 75 $\mu$ m.  
 (Fonte: o próprio autor)

Quanto às amostras para análise de variabilidade, foi possível notar grande dispersão de resultados quanto à granulometria, a Figura 14 apresenta o percentual de material passante na peneira de abertura 1,0mm. A dispersão indica variabilidade no grau de queima das cinzas, uma vez que partículas não queimadas totalmente, tendem a ser maiores. Desta forma, para que haja menor variabilidade nos parâmetros de concretos produzidos com cinzas de bateladas diferentes, é desejável maior controle na queima ou introdução de processos de beneficiamento das cinzas, como por exemplo o peneiramento. A partir dos resultados, não é possível afirmar que a exposição das cinzas aos efeitos climáticos ao longo de um ano cause grandes diferenças na finura do material.

Não foi possível determinar a densidade das partículas maiores que 0,6mm pelo método de Le Chatelier (NBR 16605:2017), pois parte deste material retido nas peneiras não submergiram no querosene, sugerindo baixa densidade destas frações ou grande porosidade, aprisionamento de bolhas de ar, ou presença de micro poros que não foram preenchidos pelo líquido, que pode estar associado à existência de vazios em estruturas celulares não totalmente queimadas. O material passante da peneira 200 (partículas menores que  $75\mu\text{m}$ ) possui densidade  $2,06\text{ g/cm}^3$ .

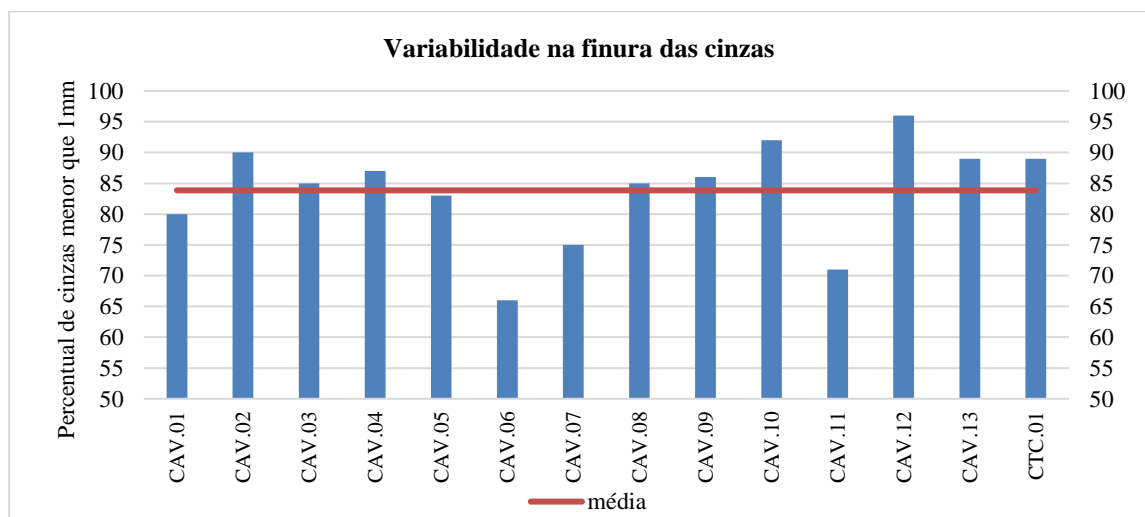


Figura 14: Variabilidade da finura das cinzas - peneiramento  
(Fonte: o próprio autor)

Utilizando o picnômetro de gás hélio, foi possível observar que a fração mais grosseira de fato apresenta menores densidades, sendo que a fração retida na peneira de 1mm apresentou  $\rho = 2,2853 \pm 0,05834\text{ g/cm}^3$ , a fração passante na peneira de 1mm apresentou  $\rho = 2,3128 \pm 0,00454\text{ g/cm}^3$ , e as amostras sem peneiramento apresentaram  $\rho = 2,3095 \pm 0,0538\text{ g/cm}^3$ . Pode ser observado também que o desvio padrão amostral apresenta valores maiores para a fração mais

grossa das cinzas, indicando que o material apresenta composição variável e com maiores dificuldades para homogeneização.

Considerando a densidade do material passante na peneira de abertura de 1mm e as Equações 4, 5, 6, 7 e 8 do Anexo 1, foi possível estimar a composição em óxidos das cinzas. Considerou-se para tal a densidade de  $2,3 \pm 0,4 \text{g/cm}^3$ . Uma vez que o maior desvio médio estabelecido pelas equações aplicáveis é de  $0,4 \text{g/cm}^3$ , e as equações foram elaboradas a partir da aproximação de uma casa decimal. Assim, tem-se a composição esperada indicada na Tabela 9.

Tabela 9: Composição das cinzas – Estimativa para os principais óxidos

Óxido	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	SiO <sub>2</sub> + Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> + Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>
Faixa esperada (% em massa)	60,7 – 88,2	4,4 – 7,5	3,5 – 5,9	68,0 – 97,0

Amostras de cinzas CTC bruta não peneirada foram observadas em um microscópio digital, as imagens obtidas seguem na Figura 15. É possível observar partículas que preservam o formato das fibras do bagaço de cana-de-açúcar e apresentam coloração escura, o que indica presença de material não completamente queimado, sendo o componente principal o carbono em vez de silício (XU *et al.*, 2018), o que também foi observado no material trabalhado por Bahurudeen *et al.* (2014). A camada epidérmica com aspecto escamoso é aleatoriamente distribuída na face da camada de carbono não queimada, preservando o padrão dos tecidos vegetais, sendo observados a estrutura celular com canais intercelulares, gerando alta porosidade no material (CORDEIRO *et al.*, 2009). Os principais elementos das partículas superficiais são Si, O e C. Nestas regiões das partículas, a composição elementar pode chegar a 80% de carbono (XU *et al.*, 2018).

Dentre as partículas observadas podem ser encontradas partículas esféricas, prismáticas, fibrosas e irregulares. Normalmente, partículas prismáticas e partículas irregulares são ricas em silício. A estrutura prismática nas partículas brancas indica cristalização que pode diminuir a atividade pozolânica das cinzas. Partículas esféricas são formadas principalmente por fusão em alta temperatura e normalmente contêm Mg, P, K, Si, Na, Fe e outros elementos em menores proporções (XU *et al.*, 2018). A sílica presente nos tecidos da planta possivelmente não tenha atingido o ponto de fusão, uma vez que a estrutura das fibras foi mantida, conforme descrito por Joshaghani, Moeni (2017). Os óxidos de silício, óxidos de ferro e óxidos de alumínio são os principais responsáveis pelas reações pozolânicas, entretanto é desejável que a sílica presente seja amorfa para que se obtenha maior reatividade com a Portlandita formada nas reações de hidratação do cimento (PARIS *et al.*, 2016).

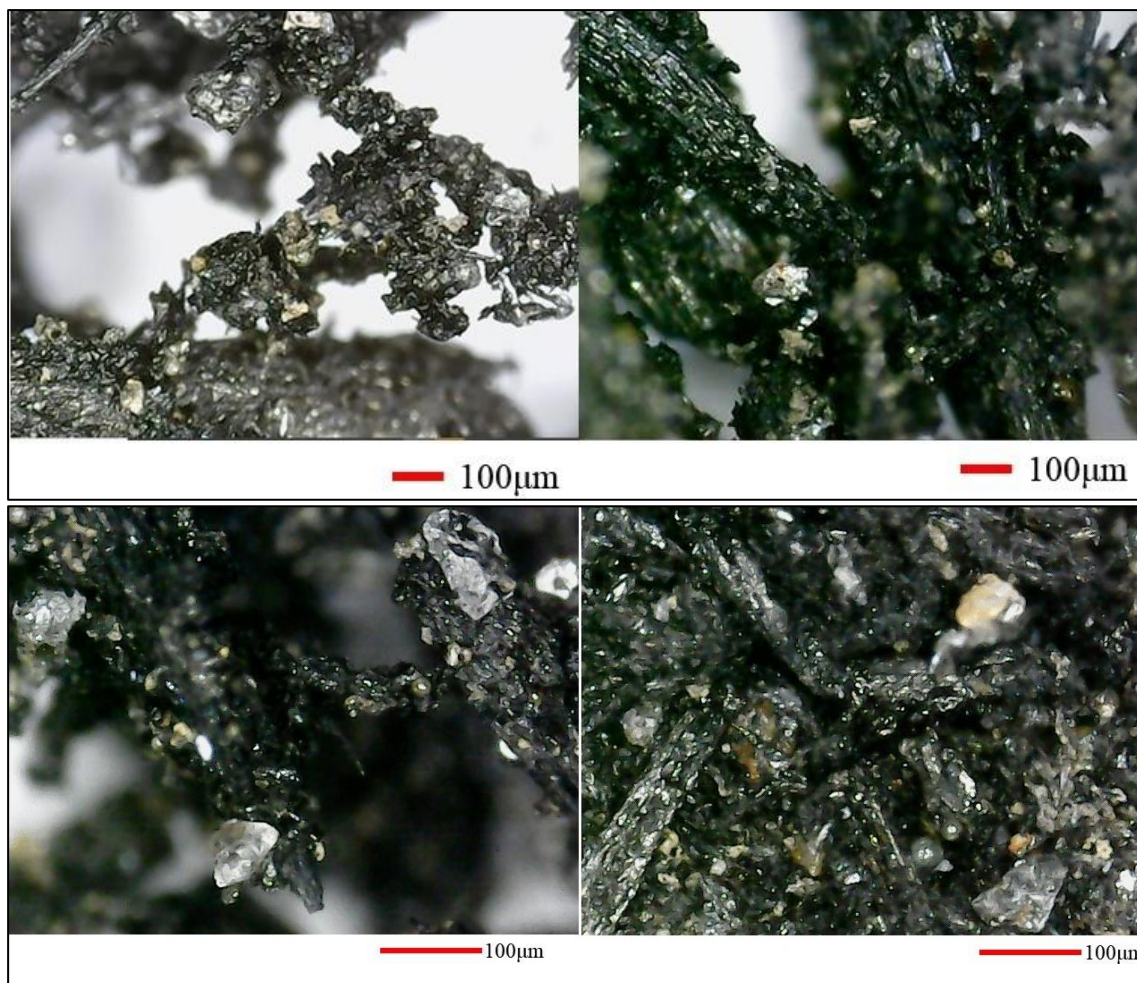


Figura 15: Grãos de cinza de bagaço de cana de açúcar vistos em microscópio digital  
(Fonte: o próprio autor)

### 5.1.3 Reatividade das cinzas

Segundo Luxan *et al.* (1989), a reação entre hidróxido de cálcio em solução aquosa e material pozzolânico fino produz uma diminuição na condutividade elétrica da suspensão, devido à fixação de  $\text{Ca(OH)}_2$  dissolvido pela superfície da partícula de pozolana. Os mesmos autores estabeleceram uma classificação da atividade pozzolânica de um material de acordo com o valor da variação da condutividade após 120 s da adição do material à uma suspensão de hidróxido de cálcio. No entanto, este método não leva em consideração a presença de sais solúveis em água e no material estudado. Esta situação não pode ser assumida quando cinzas volantes são testadas por métodos condutimétricos devido a presença de quantidade relativamente elevada de sais solúveis nas partículas, principalmente depositadas na superfície (PAYA *et al.*, 2001).



Desta forma, Paya *et al* (2001), propuseram algumas alterações no ensaio e na análise. Quando a cinza volante é adicionada à solução saturada de hidróxido de cálcio, ocorre uma precipitação de  $\text{Ca(OH)}_2$  porque o produto iônico torna-se maior do que a solubilidade. Este fenômeno pode ser evitado quando as cinzas volantes são adicionadas em soluções insaturadas de  $\text{Ca(OH)}_2$  e, portanto, o material reativo permaneceria completamente em solução. Foi proposto também que a condutividade da solução de cinzas em meio aquoso seja subtraída da condutividade da solução de hidróxido de cálcio e cinzas.

No atual estudo foram feitas as seguintes adaptações:

- utilizou-se as quantidades de 300ml de solução por reação, devido ao fato de as cinzas brutas apresentarem partículas relativamente grandes, que tornaria o ensaio em frascos de 50ml inviável;
- fixou-se a proporção de 0,04:1 de cinzas para solução em massa;
- foi utilizada cal CH-I nos experimentos;
- a solução de hidróxido de cálcio foi produzida adicionando 80mg/100ml de cal CH-I em água à 80°C por uma hora, depois a solução foi resfriada gradualmente até a temperatura de ensaio de  $40 \pm 1^\circ\text{C}$  num intervalo de 30 min.

A Figura 16 mostra esquematicamente o aparato experimental. Foi utilizado um condutivímetro digital (faixa operacional: 0~19990 $\mu\text{s/cm}$ ). Como resultado, obteve-se os gráficos das Figuras 17, 18, 19 e 20 que exibem, respectivamente a condutividade das soluções, a condutividade das misturas de cinzas e solução de hidróxido de cálcio corrigidas e a perda de condutividade percentual (LC) no tempo, conforme estabelecidos por Paya *et al.* (2001). Pela Figura 17, conclui-se que as cinzas possuem caráter levemente básico, aumentando o pH da água ao longo do tempo, entretanto ao ser misturada na solução de  $\text{Ca(OH)}_2$ , a reação ocorrida reduz o pH de cerca de 11, para 10.

A partir das Figuras 18, 19 e 20, é possível verificar que houve queda na condutividade elétrica da solução de hidróxido de cálcio após a adição das cinzas, o que pode indicar precipitação do hidróxido de cálcio, absorção ou adsorção pelas partículas de cinza ou reação entre os materiais. A condutividade tendeu aos mesmos valores da condutividade da solução de cinzas em água. Desta maneira, não é possível inferir sobre o grau de reatividade das cinzas.

Outra observação pertinente é que a solução de cal CH-I não atingiu os mesmos níveis de condutividade que os produtos utilizados por Paya *et al.* (2001), que chegaram a valores em torno

de 5 a 6 mS/cm. Desta forma, verifica-se a necessidade de novas pesquisas que utilizem materiais de granulometria mais grosseira (como as cinzas desta pesquisa) e reagentes comuns ao cotidiano da engenharia civil (como a cal hidratada CH-I). Em partículas grosseiras pode haver interferência de processos de dissolução, adsorção e absorção envolvidos, que podem alterar os resultados.

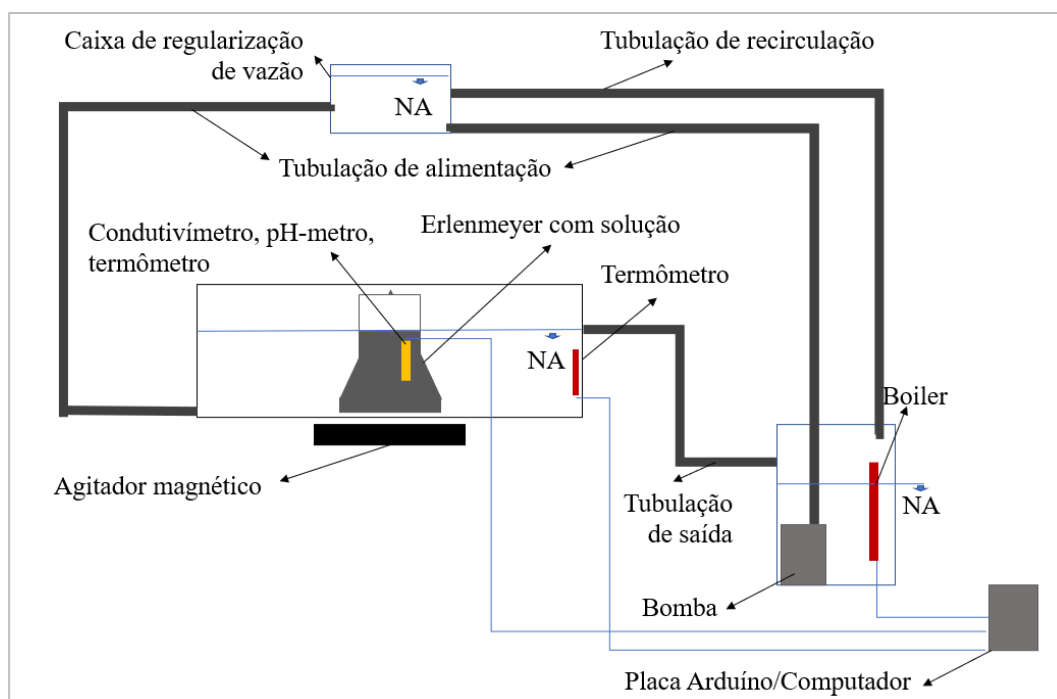


Figura 16: Montagem do ensaio de reatividade das cinzas com cal CH-I  
(Fonte: o próprio autor)

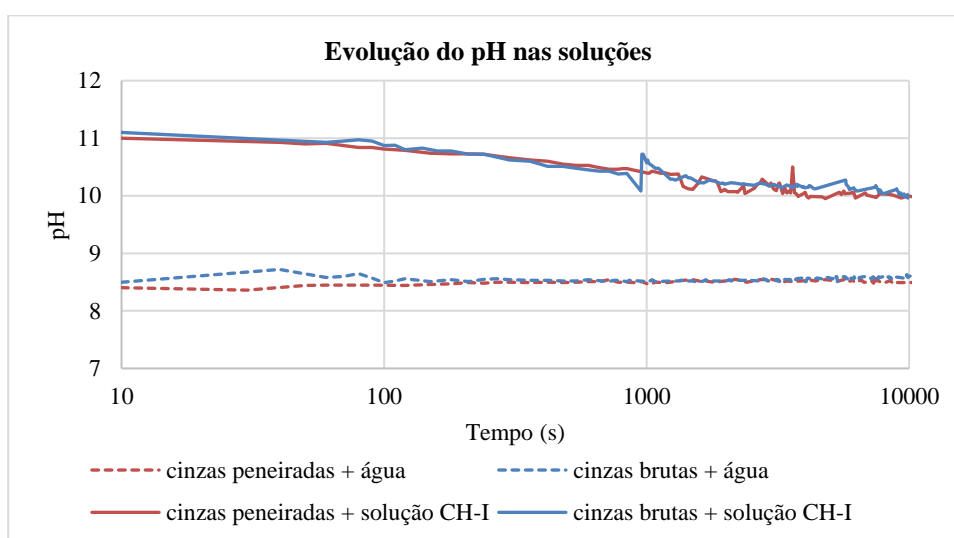


Figura 17: Evolução do pH nas soluções  
(Fonte: o próprio autor)

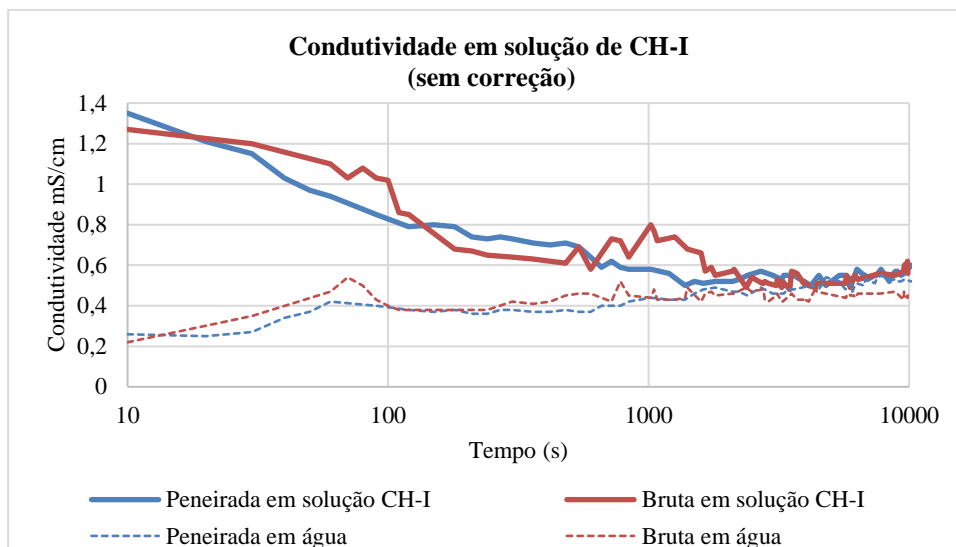


Figura 18: Evolução da condutividade das soluções no tempo  
(Fonte: o próprio autor)

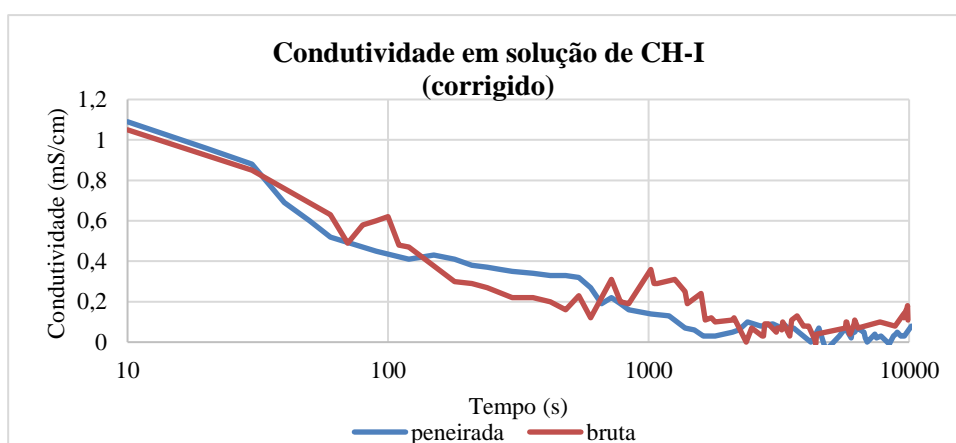


Figura 19: Condutividade das cinzas em solução de CH-I - corrigida  
(Fonte: o próprio autor)

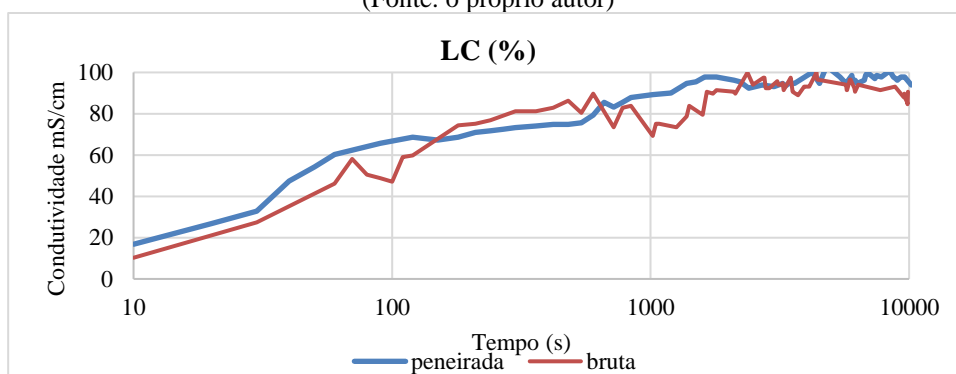


Figura 20: Perda da condutividade no tempo  
(Fonte: o próprio autor)

## 5.2 Segunda Fase

O consumo de materiais para a produção dos concretos estudados segue na Tabela 2. Baseado na revisão de literatura, foi observado que há uma tendência de decréscimo na resistência do concreto com o aumento da fração de cimento Portland substituída pelas cinzas (CBCA), tendo sido relatados ganhos de resistência quando frações de 5% de cinzas peneiradas são utilizadas como substituição (BATOOL *et al.*, 2020; GAR *et al* 2017; HUSSEIN, *et al.*, 2014; NESAN *et al.*, 2007). Desta forma, focou-se neste estudo a avaliação da substituição de 5% tanto de cimento quanto de areia por CBCA brutas. Adicionalmente, foram avaliadas as alterações causadas pela adição de cristalizante concomitantemente com as cinzas na substituição por areia, como tentativa de melhorar as características do concreto obtido. A relação água/cimento (a/c) foi corrigida nas dosagens de forma a considerar o teor de umidade das cinzas, garantindo a mesma quantidade de água em todas as misturas. Foi utilizado 2% de plastificante com relação à massa de cimento. O Xypex Admix C-500NF, quando aplicado no concreto reage com os subprodutos da reação de hidratação do cimento causando uma reação catalítica, gerando cristais insolúveis nos poros e capilaridades do concreto. No trabalho foi utilizada a dosagem de 0,8% sobre a massa de cimento.

Tabela 10: Material consumido para a produção de 1m<sup>3</sup> de concreto – Fase 2

Dosagem	Cimento (kg)	Cinzas (kg)	Areia (kg)	Brita (kg)	Plast.*	Crist.	a/c
Referência	370	-	740	1110	2% <sup>1</sup>	-	0,5
1	351,5	18,5	740	1110	2% <sup>1</sup>	-	0,5
2	370	37	703	1110	2% <sup>1</sup>	-	0,5
3	370	37	703	1110	2% <sup>1</sup>	0,8% <sup>1</sup>	0,5

<sup>1</sup>porcentagem com relação à massa de cimento; <sup>2</sup>corpo de prova após a cura

\* ADVA® FLOW 880

### 5.2.1 Resistência e durabilidade

A partir da análise dos valores de slump (Tabela 11), observa-se que a substituição de cimento por cinzas pouco alterou a trabalhabilidade (0,5cm ou 4%), já a substituição de areia, causou perda de trabalhabilidade do concreto, chegando à condição de slump zero. Isto pode ter decorrido da maior absorção de água causada pelas cinzas. Todavia, mesmo com a perda de trabalhabilidade, o concreto resultante apresentou integridade e homogeneidade, conforme pode ser verificado nas figuras 21, 22, 23 e 24, que apresentam o estado do concreto fresco e a seção transversa dos corpos de prova após a cura. Para determinar a resistência mecânica à compressão, foram testados cinco corpos de prova de cada dosagem, estando os resultados apresentados na Tabela 11.

Tabela 11: Resultados dos ensaios de compressão e trabalhabilidade

Dosagem	Slump (cm)	Resistência (MPa)			Ganho de resistência	Valor p
		Valores - corpos de prova (CP)	Média	Desvio padrão		
Referência	12,0	CP1 - 28,5; CP2 - 23,4 CP3 - 24,9; CP4 - 21,3 CP5 - 25,1	24,6	2,64	-	-
1	11,5	CP1 - 25,2; CP2 - 22,1 CP3 - 22,5; CP4 - 25,2 CP5 - 21,4	23,3	1,81	-5,5% <sup>1</sup>	0,186
2	0,0	CP1 - 19,4; CP2 - 22,2 CP3 - 23,0; CP4 - 23,5 CP5 - 19,5	21,5	1,96	-12,7% <sup>1</sup>	0,033
3	0,0	CP1 - 23,1; CP2 - 28,5 CP3 - 25,9; CP4 - 28,3 CP5 - 23,2	25,8	2,61	4,7%	0,252

<sup>1</sup> valores negativos representam médias inferiores ao traço de referência

Embora a substituição de cimento por cinzas tenha causado uma pequena redução na média das resistências à compressão (inferior a 6%), em termos estatísticos a alteração é insignificante, de forma que a substituição de 5% do cimento por cinzas não altera a resistência do concreto. Já a substituição de 5% de areia por cinzas causa perda de resistência (entre 10 e 15%). Entretanto quando a substituição de 5% da areia é acompanhada de adição de cristalizante, não ocorre alteração significativa na resistência se comparado ao concreto de referência.

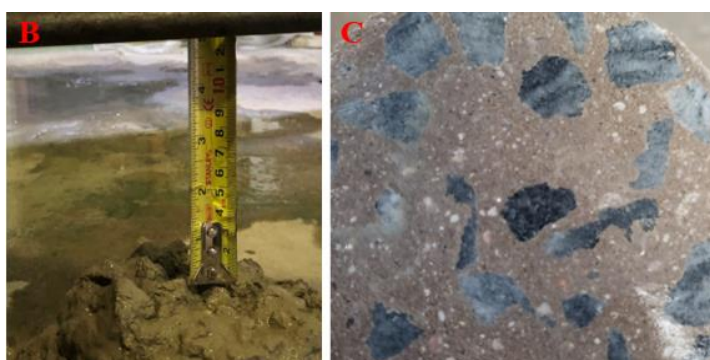


Figura 21: Aspecto e trabalhabilidade do concreto de referência  
(Fonte: o próprio autor)



Figura 22: Aspecto e trabalhabilidade do concreto – dosagem 1  
(Fonte: o próprio autor)



Figura 23: Aspecto e trabalhabilidade do concreto – dosagem 2  
(Fonte: o próprio autor)



Figura 24: Aspecto e trabalhabilidade do concreto – dosagem 3  
(Fonte: o próprio autor)

Foram realizados ensaios de absorção de água nas amostras de concreto seguindo a preconização da norma ABNT NBR 9778:2009, estando os resultados apresentados nos gráficos das Figuras 25 e 26. Pode ser observado que, as substituições por cinzas não ocasionaram grandes alterações nos índices obtidos, havendo tendência de aumento na absorção de água e índices de vazios (entre 10 e 20%), sendo todas as alterações consideradas estatisticamente significantes (valor- $p < 0,05$ ). É possível observar que, com o aumento do índice de vazios, também aumentou a absorção de água e houve redução da resistência média, conforme esperado. Todos os traços testados resultaram em absorção inferior a 10%, o que indica boa durabilidade para o material

(NEVILE, 1997). O cristalizante empregado, reduziu o índice de vazios e a absorção do concreto em que a cinza foi empregada como substituinte da areia. Embora a média amostral indique redução da massa específica para os concretos que empregaram cinzas de bagaço de cana-de-açúcar, a análise estatística (ANOVA, confiança de 95% - ANEXO C) indica que a variação na massa específica é insignificante, e, portanto, considera-se que a substituição não impactou na massa específica.

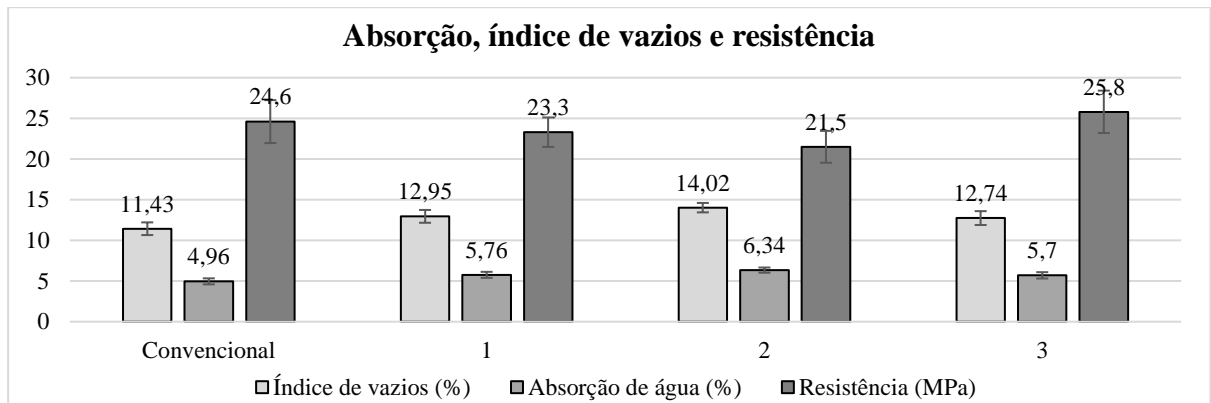


Figura 16: Absorção, índice de vazios e resistência – 2ª Fase  
(Fonte: o próprio autor)

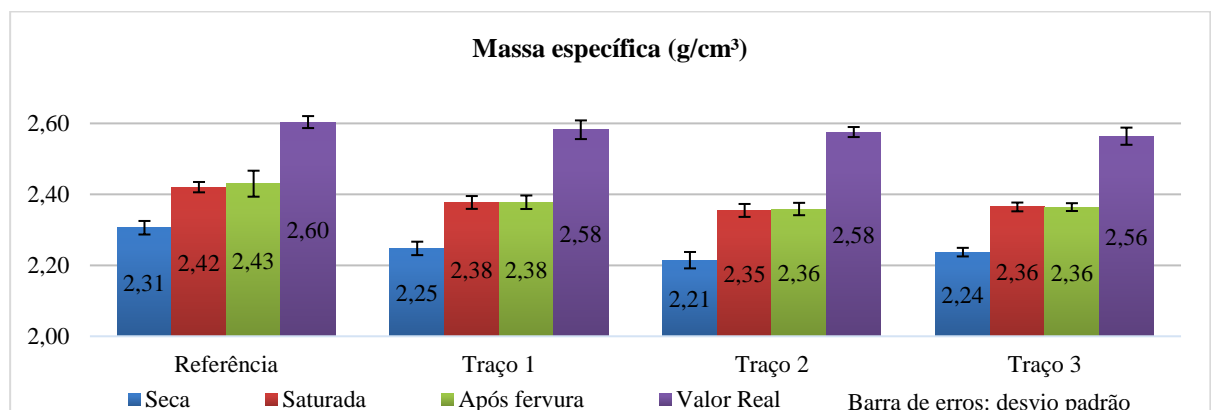


Figura 17: Massa específica dos concretos testados  
(Fonte: o próprio autor)

### 5.3 Terceira Fase

O consumo de materiais para a produção dos concretos estudados segue na Tabela 12. Com base nos resultados da Fase 2, foi verificado que, quanto à durabilidade e resistência, desconsiderando adições, as cinzas brutas de bagaço de cana-de-açúcar (CBCA) apresentaram maiores potenciais para serem empregadas como substituição parcial ao Cimento Portland. Desta forma, focou-se neste estudo a avaliação da substituição de 5, 10 e 15% do cimento, mantendo a proporção de aglomerante/aglomerado e a relação água cimento (a/c). A umidade das cinzas

(5,0±2,0%) foi utilizada na correção da quantidade de água utilizada, de forma a garantir a mesma relação a/c em todas as misturas. Foi utilizado 2% de plastificante com relação à massa de cimento.

Tabela 12: Dosagens utilizadas na substituição de cimento por CBCA

Dosagem	Cimento (kg)	Cinzas (kg)	Areia (kg)	Brita (kg)	Plast.*	Crist.	a/c
Referência	370	-	740	1110	2% <sup>1</sup>	-	0,5
5%	351,5	18,5	740	1110	2% <sup>1</sup>	-	0,5
10%	333	37	740	1110	2% <sup>1</sup>	-	0,5
15%	314,5	55,5	740	1110	2% <sup>1</sup>	-	0,5

<sup>1</sup>porcentagem com relação à massa de cimento; <sup>2</sup>corpo de prova após a cura;

\*ADMENT PREMIUM

### 5.3.1 Resistência e durabilidade

A partir da análise dos valores de slump (Tabela 13), observa-se que a substituição de cimento por cinzas causou grande alteração na trabalhabilidade do concreto, chegando à condição de slump zero, condições que podem ser observadas na Figura 25. Para determinar a resistência mecânica à compressão do concreto, foram testados seis corpos de prova de cada traço, estando os resultados apresentados na Tabela 13. Todas as substituições de cimento Portland por cinzas testadas causaram aumento no valor médio da resistência. Entretanto, para as substituições de 5 e 15% o aumento na resistência não deve ser considerado, uma vez que o conjunto de dados obtidos não apresentou diferenças estatísticas significativas (valor-p > 0,5 confirma a hipótese nula). Já a substituição de 10% do cimento por cinzas aumentou a resistência do concreto em 25%.

Tabela 13: Resultados dos ensaios de compressão e trabalhabilidade

Dosagem	Slump (cm)	Resistência (MPa)			Ganho de resistência	Valor p
		Valores - corpos de prova (CP)	Média	Desvio padrão		
Referência	15,0	CP1 – 15,6; CP2 – 15,8	14,5	1,37	-	-
		CP3 – 14,5; CP4 – 15,2				
		CP5 – 14,0; CP6 – 12,1				
5%	2,0	CP1 – 15,7; CP2 – 16,0	14,8	1,94	1,5%	0,41421
		CP3 – 14,4; CP4 – 12,8				
		CP5 – 17,3; CP6 – 12,3				
10%	0,0	CP1 – 18,6; CP2 – 19,5	18,2	1,47	25,2%	0,00061
		CP3 – 18,1; CP4 – 19,8				
		CP5 – 15,8; CP6 – 17,4				
15%	0,0	CP1 – 15,2; CP2 – 17,8	15,8	1,24	9,3%	0,05192
		CP3 – 17,0; CP4 – 14,6				



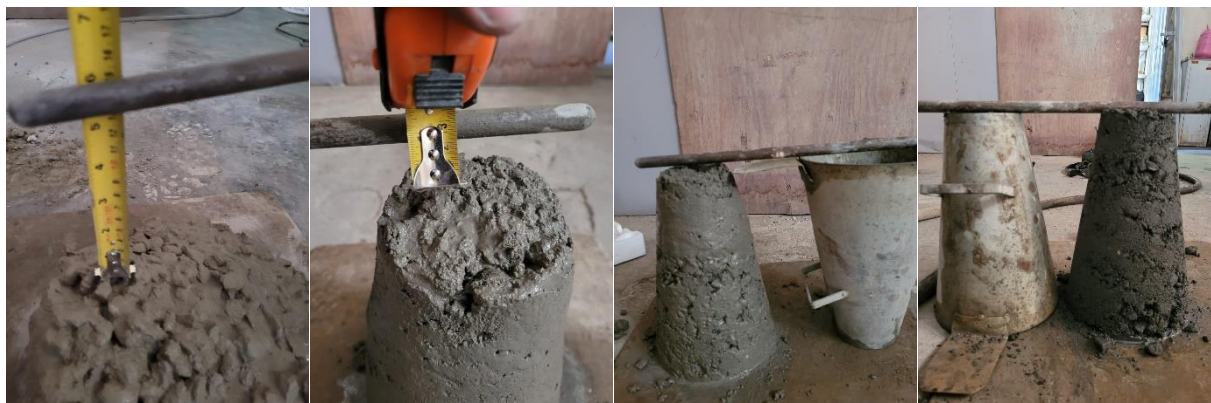


Figura 25: Aspecto e trabalhabilidade do concreto – substituição cimento por CBCA  
(Fonte: o próprio autor – da esquerda para a direita dosagens: referência, 5%, 10% e 15%)

Foram realizados ensaios de absorção de água nas amostras de concreto seguindo a preconização da norma ABNT NBR 9778:2009, estando os resultados apresentados nos gráficos das Figuras 26 e 27. As substituições por cinzas causaram aumento na taxa de absorção de água e no índice de vazios, conforme observado por Ganesan et al. (2007), sendo que a resistência não diminuiu com o aumento da absorção. Porém, estes resultados diferem dos obtidos por Silva et al. (2021) e Sampaio et al. (2014), que encontraram menores índices de vazios para substituições de 10% de cimento que para o concreto convencional. No entanto, todos os concretos produzidos apresentaram taxa de absorção de água inferior à 10% e índice de vazios inferior à 20%, indicando que o concreto obtido possui boas características quanto à durabilidade (NEVILLE, 1997). Foi observado que estes índices apresentaram variação linear com o aumento do teor de substituição do cimento Portland, sendo este comportamento apresentado na Tabela 14 e na Figura 28. Todas as alterações causadas pelas substituições nos índices de vazios e taxas de absorção são consideradas estatisticamente significantes (valor- $p < 0,05$  – ANEXO D). Não foi notada uma relação direta entre redução da resistência com o aumento do índice de vazios ou aumento da taxa de absorção de água. A substituição de 5% de cimento por CBCA não causou alteração significativa na massa específica do concreto obtido, as demais substituições causaram redução.

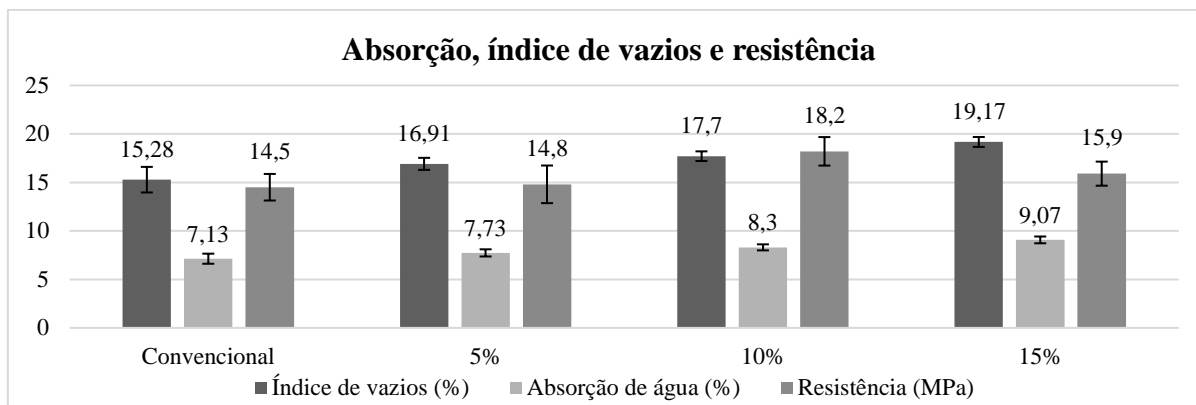


Figura 26: Absorção, índice de vazios e resistência – 3ª Fase  
(Fonte: o próprio autor)

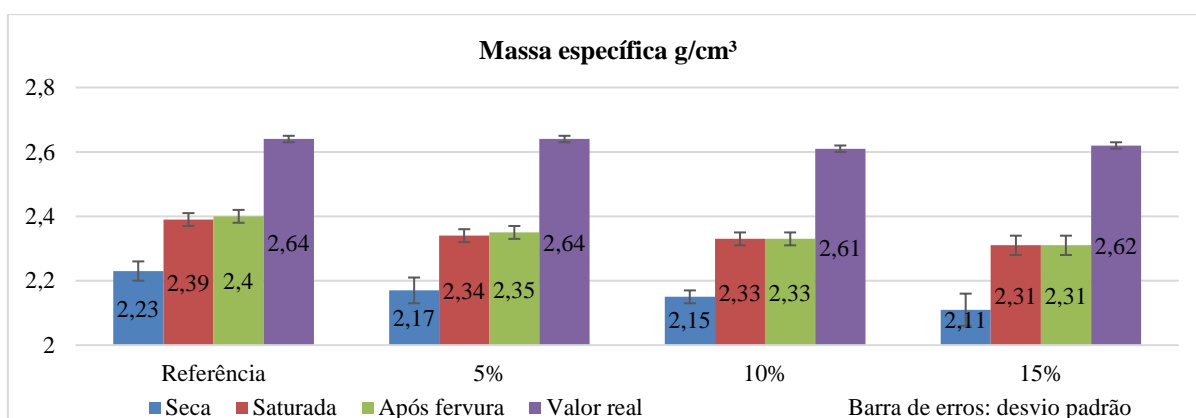


Figura 27: Massa específica dos concretos testados – 3ª Fase  
(Fonte: o próprio autor)

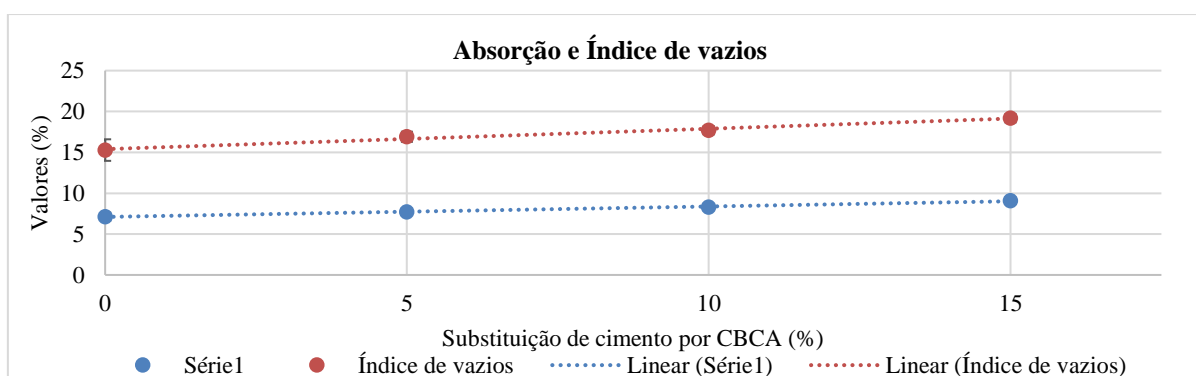


Figura 28: Relação linear entre teor de substituição, absorção e índice de vazios  
(Fonte: o próprio autor)

Tabela 14: Regressão linear sendo x o valor percentual da substituição de cimento

	Coefficiente angular	Coefficiente linear	R <sup>2</sup>
Taxa de absorção de água (%)	0,1278	7,099	0,9952
Índice de vazios	0,2492	15,396	0,9845

Assim como na Fase 2 do estudo, a substituição de 5% do cimento Portland por cinzas não causou alterações estatísticas significantes na resistência, o que confirma a replicabilidade dos resultados. Entretanto a alteração do produto superplastificante resultou em um concreto de menor resistência mecânica que o observado na Fase 2. Com relação à revisão da literatura, o concreto produzido atingiu a resistência esperada segundo o gráfico da Figura 29. A faixa provável de resultados foi elaborada considerando os gráficos das Figuras 5 e 6. Mesmo as cinzas utilizadas neste trabalho apresentando granulometria mais grosseira que os trabalhos selecionados na revisão sistemática, o ganho de resistência foi positivo, indicando que o material apresenta boas características para a utilização proposta.

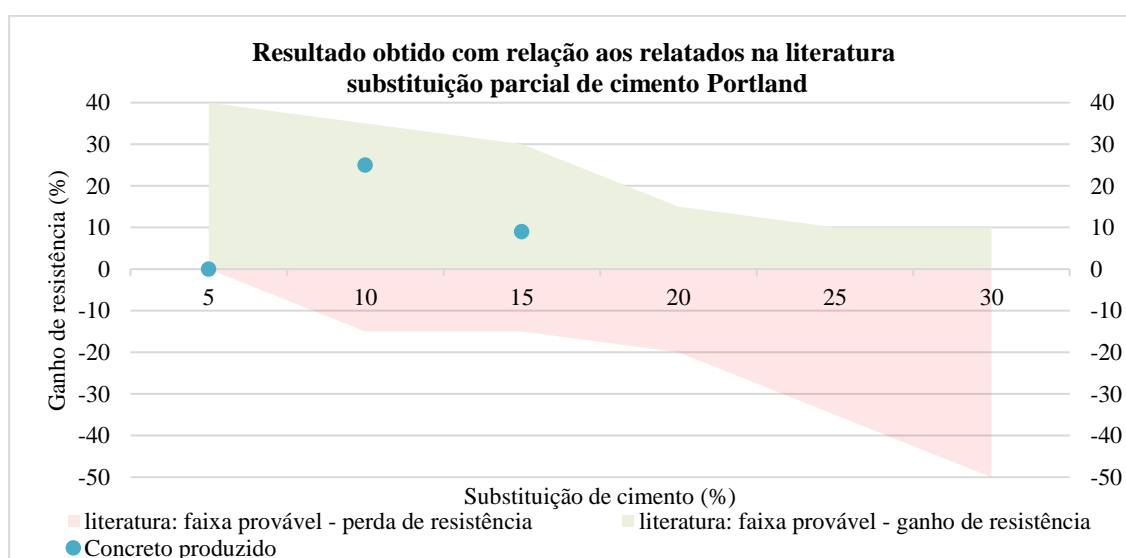


Figura 29: Comparação de resistências obtida – observada na revisão de literatura (Figura elaborada considerando valores da Figuras 5 e 6 e Tabela 13)

A resistência à tração foi determinada por ensaios de compressão diametral, sendo os resultados interpretados e comparados com as estimativas propostas pela ABNT NBR 5739 seguindo as Equações de 7 a 12. Os resultados estão apresentados na Tabela 15.

Tabela 15: Resultados e estimativas para a resistência à tração

Dosagem	Força na ruptura (kN)	Resistência à tração (MPa)					Ganho de Resistência	Valor p
		Experimental – calculada		Estimada (NBR 5739:2018)				
		Diametral <sup>1</sup>	Direta <sup>1</sup>	$f_{ctk, inf}$	$f_{cm}$	$f_{ctk, sup}$		
Referência	CP1-76,5; CP2-87,2; CP3-75,0	2,54 (8%)	2,28 (8%)	1,12	1,60	2,08	-	-
5%	CP1-85,8; CP2-90,6; CP3-70,7	2,62 (13%)	2,36 (13%)	1,07	1,53	1,99	3,5%	0,359
10%	CP1-79,4; CP2-85,8; CP3-100,9	2,82 (12%)	2,54 (12%)	1,32	1,89	2,46	11,4%	0,150
15%	CP1-87,2; CP2-81,3; CP3-89,2	2,74 (5%)	2,46 (5%)	1,21	1,73	2,24	7,9%	0,123

<sup>1</sup> valor da variância entre parênteses

$$f_{ck} = f_{cm} \times 1,65 s \quad (7)$$

$$f_{td} = \frac{2F}{\pi d L} \quad (8)$$

$$f_{ctk} = 0,9 \times f_{td} \quad (9)$$

$$f_{ctm} = 0,3 \times f_{ck}^{2/3} \quad (10)$$

$$f_{ctk,inf} = 0,7 \times f_{ctm} \quad (11)$$

$$f_{ctk,sup} = 1,3 \times f_{ctm} \quad (12)$$

Em que:

$f_{ck}$  resistência característica do concreto aos 28 dias

$f_{cm}$  média das resistências à compressão obtidas em ensaio

$s$  desvio padrão amostral

$f_{td}$  resistência à tração por compressão diametral (MPa)

$F$  força máxima obtida no ensaio de compressão diametral (kN)

$d$  diâmetro do corpo de prova (mm)

$L$  comprimento do corpo de prova (mm)

$f_{ctk}$  resistência à tração direta

$f_{ctm}$  estimativa de resistência à tração média (ABNT NBR 5739)

$f_{ctk,inf}$ ,  $f_{ctk,sup}$  estimativa de limites de resistência à tração inferior e superior, respectivamente (ABNT NBR 5739)

A partir dos resultados da Tabela 15, verifica-se que a resistência à tração média apresentada pelos concretos produzidos é cerca de 40% maior que o valor estimado segundo a metodologia da ABNT NBR 5739 (2018). É observado que a média de resistência dos concretos que empregaram as cinzas foi maior que a do concreto de referência, contudo a diferença não pode ser considerada estatisticamente significativa, de forma que, deve ser considerado que a substituição de cimento por cinzas não alterou a resistência à tração.

### 5.3.2 Módulo de elasticidade

Os resultados dos ensaios para a obtenção do módulo de elasticidade estão apresentados na Figura 30 e na Tabela 16, que exibem, respectivamente, os gráficos tensão x deformação dos ensaios e o resumo dos resultados numéricos.

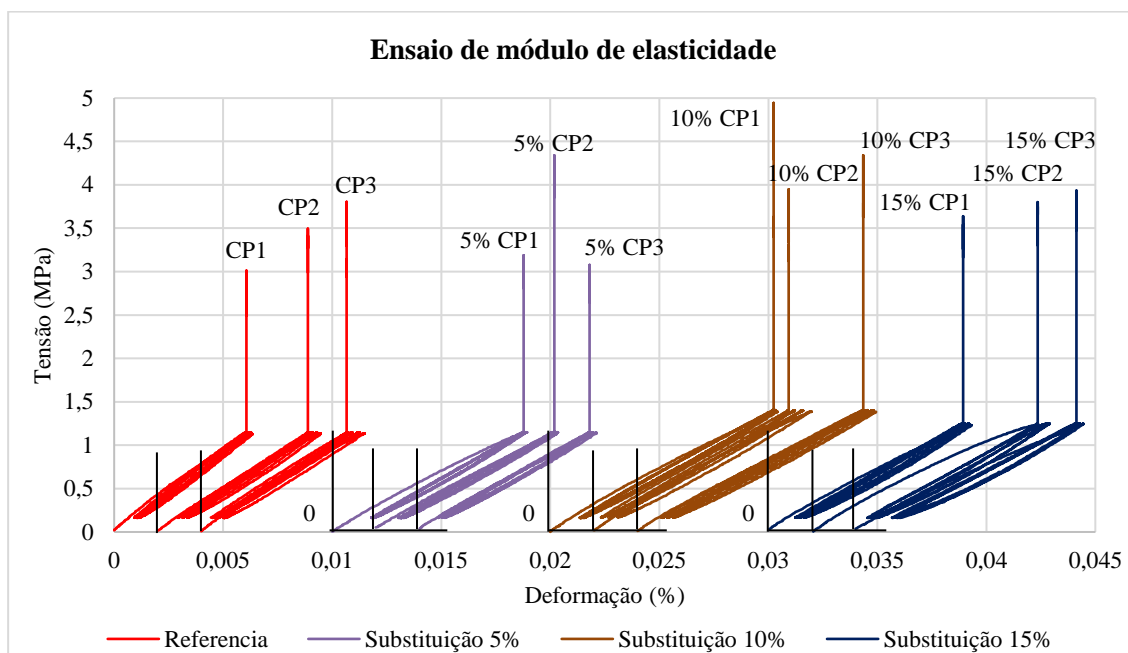


Figura 30: Curvas Tensão x Deformação durante os ensaios  
(Fonte: o próprio autor)

Tabela 16: Resultado dos ensaios de módulo de elasticidade

Dosagem	Módulo de elasticidade (GPa)			Ganho médio	Valor p
	Valores - corpos de prova (CP)	Média	Desvio padrão		
Referência	CP1 - 38,08; CP2 - 32,51; CP3 - 31,73	34,11	3,46	-	-
5%	CP1 - 28,33; CP2 - 27,75; CP3 - 28,26	28,11	0,32	-17,6%	0,0472
10%	CP1 - 27,98; CP2 - 28,57; CP3 - 26,83	27,79	0,89	-18,5%	0,0396
15%	CP1 - 28,23; CP2 - 28,02; CP3 - 25,79	27,35	1,35	-19,8%	0,0312

De forma geral, os concretos produzidos apresentaram valor de módulo de elasticidade de cerca de 30 GPa. O valor do módulo de elasticidade dos concretos que utilizaram as cinzas de bagaço de cana-de-açúcar apresentou queda, estatisticamente significativa, de cerca de 20%. Foi notado que quanto maior o teor de substituição, maior a queda no valor do módulo de elasticidade. Entretanto, o módulo de elasticidade dos concretos que utilizaram substituições parciais de cimento Portland por CBCA, ainda se encontram na faixa de 15 à 40% maior que os valores estimados pelas metodologias de cálculo estrutural propostas pela NZS3101, IS456,

ACI318, AS3600 e ABNT NBR 6118 (2007), conforme apresentado na Tabela 17 e na Figura 31.

Tabela 17: Métodos de estimativa do módulo de elasticidade

Legenda	A1	A2	B1	B2	C1	C2	D1	D2
Método	NZS3101		IS456		ACI318; AS3600		ABNT NBR 6118 (2007)	
$E_{ci}$	$3320\sqrt{f_c} + 6900$		$5000\sqrt{f_c}$		$\rho^{1,5}(0,043\sqrt{f_c})$		$5600\sqrt{f_c}$	
$f_c$	Média experimental	$f_{ck}$	Média experimental	$f_{ck}$	Média experimental	$f_{ck}$	Média experimental	$f_{ck}$

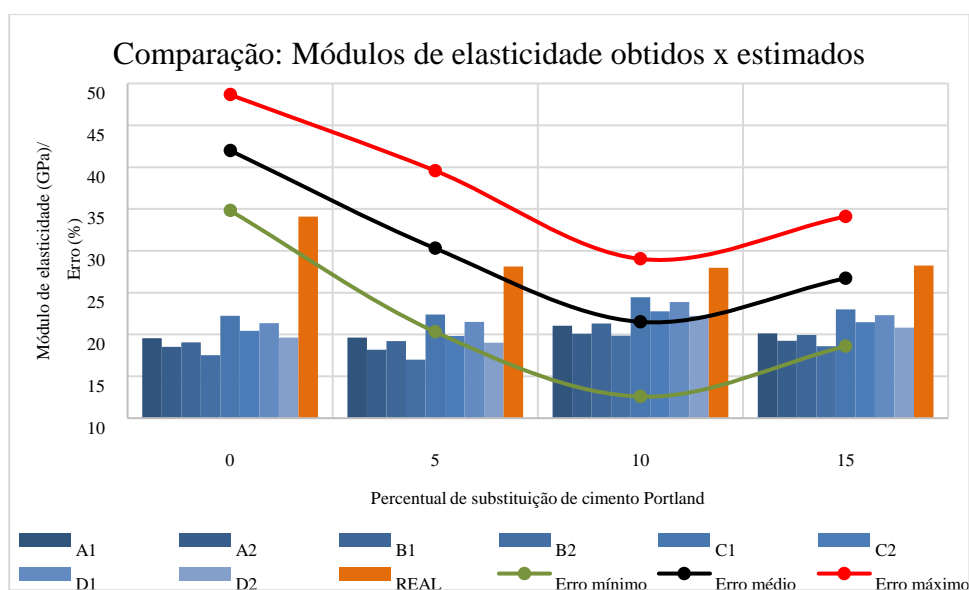


Figura 31: Estimativas e valor real do módulo de elasticidade (Fonte: o próprio autor)

Nota-se que as substituições de cimento por CBCA causaram quedas nos valores dos módulos de elasticidade superiores aos relatados na revisão de literatura (Tabela 3), porém, Cordeiro *et al.* (2018) também relataram quedas expressivas (10%) no módulo de elasticidade quando empregadas substituições de cimento por cinzas. Isso pode decorrer do fato de que a revisão selecionou artigos em que as cinzas empregadas apresentavam partículas mais finas que as utilizadas nesta pesquisa, que promove melhor empacotamento de agregados e melhoram as zonas de transição. Como neste trabalho optou-se por estudar substituições de cinzas brutas com apenas o peneiramento de frações superiores à 1,0mm, é esperado que as cinzas empregadas possuam características morfológicas e composição química desfavoráveis. Ou seja, maior presença de materiais não queimados, maiores porosidades, gerando zonas de transição na pasta cimentícia mais frágeis devido à absorção excessiva de água e menor pozolanicidade. Apesar disso, ainda assim os módulos de elasticidade obtidos foram maiores que os estimados.

### 5.3.3 Análises de picnometria (He)

A partir das análises realizadas no picnômetro e nos ensaios de absorção de água, foram propostas equações para explicar a diferença nas massas específicas e estimar a quantidade de vazios presentes no concreto, seja do ponto de vista de macro, meso e micro poros. Considerando que pelo tamanho das moléculas envolvidas em cada ensaio, a determinação do volume de sólidos e o acesso aos retículos e vazios se altera. Partindo das equações do ensaio de absorção de água e dos conceitos básicos envolvidos na determinação da massa específica no ensaio de picnometria de gás hélio, têm-se as Equações de 13 a 20.

$$\rho_{seca} = \frac{m_{seca}}{m_{sat} - m_i}; \quad (13)$$

$$m_i = m_{sat} - E, \text{ em que: } E = V'_{sol} \times \rho_{H_2O}; \rho_{H_2O} = \frac{1g}{cm^3} \rightarrow E = V'_{sol} \quad (14)$$

$$\rightarrow \rho_{seca} = \frac{m_{seca}}{m_{sat} - m_{sat} + V'_{sol}} \rightarrow \frac{m_{seca}}{V'_{sol}} \quad (15)$$

$$\rho_{pic} = \frac{m_{seca}}{V''_{sol}} \quad (16)$$

$$V'_{sol} = V''_{sol} + V_v \quad (17)$$

$$a \times \rho_{pic} = \rho_{seca} \rightarrow a = \frac{\rho_{seca}}{\rho_{pic}} \rightarrow a = \frac{m_{seca}/V'_{sol}}{m_{seca}/V''_{sol}} = \frac{V''_{sol}}{V''_{sol} + V_v}; \quad (18)$$

Sendo:

$\rho_{seca}$  massa específica seca do concreto obtida pelo ensaio de absorção

$m_{seca}$  massa de concreto seca em estufa

$m_{sat}$  massa do concreto saturada em água

$m_i$  massa de concreto saturado imerso

$E$  Empuxo

$V'_{sol}$  Volume de concreto desconsiderando os poros e canais ocupados por água

$\rho_{pic}$  massa específica seca do concreto obtida pelo ensaio em picnômetro à He

$V''_{sol}$  Volume de concreto desconsiderando os poros e canais ocupados pelo He

$V_v$  Volume de vazios que podem ser preenchidos pelo He, porém que não podem ser preenchidos por água

$a$  coeficiente de ajuste, relação de divisão entre  $\rho_{seca}$  por  $\rho_{pic}$

Ou seja  $a$  representa, desconsiderando os poros conectados que podem ser preenchidos por água, a porcentagem do volume restante que de fato é preenchido por material sólido, sendo assim, temos a Equação 19:

$$1 - a = b = 1 - \frac{V''_{sol}}{V''_{sol} + V_v} \quad (19)$$

Na qual  $b$  representa a porcentagem de poros e retículos vazios do volume de concreto calculado ao qual a água não teve acesso no ensaio de absorção. Assim pode-se definir a

porcentagem do volume total do concreto que é composto de vazios que podem ser acessado pelo gás hélio, porém não é acessado pela água ( $c$ ) pela Equação 20, na qual  $I$  é o índice de vazios calculado no ensaio de absorção. Deste modo, a porcentagem de volume sólido do concreto ( $V_{sol}$ ) com relação ao volume total será dado pela Equação 21.

$$(1 - I) \times b = c \quad (20)$$

$$V_{sol} = 1 - I - c \quad (21)$$

A partir dos resultados obtidos pelos ensaios de picnometria de gás hélio e das Equações 13 a 21, pode ser elaborada a Tabela 18. Os resultados dos ensaios de picnometria estão dentro do esperado segundo os resultados obtidos com a resistência mecânica do concreto à compressão. Os valores obtidos para as substituições de 5 e 15% de cimento foram próximos entre si e ligeiramente inferior ao do concreto de referência, enquanto que o valor apresentado para a substituição de 10% foi maior, indicando que a parte sólida do concreto apresentou uma matriz mais densa, que pode estar relacionada ao melhor desempenho mecânico. Entretanto, se observadas as equações e os valores obtidos no ensaio de absorção de água, verifica-se que houve uma mudança na distribuição do tamanho de poros do concreto. O índice de vazios, calculado com base nos poros que podem ser preenchidos com água, apresentou valores crescentes com o aumento no teor da substituição. Porém o valor do índice de vazios, calculado com base no preenchimento por hélio, desconsiderando os possíveis de ser preenchido com água, não apresentou relação linear.

Tabela 18: Relação de volume de vazios e volume de sólidos nos concretos

Dosagem	Massa específica (g/cm <sup>3</sup> )		Índices de cálculo		Índice de vazios <sup>1</sup> (%)	Microporosidade (%)	V <sub>sol</sub> (%)
	Seca <sup>1</sup>	Picnometria	a	B			
Ref	2,23	2,6262 (±0,0011)	0,85	0,15	15,28	12,78	71,94
5%	2,17	2,5911 (±0,0014)	0,84	0,16	16,91	13,50	69,59
10%	2,15	2,6980 (±0,0010)	0,80	0,20	17,70	16,72	65,58
15%	2,11	2,5661 (±0,0019)	0,82	0,18	19,17	14,37	66,46

<sup>1</sup> resultados obtidos a partir do ensaio de absorção de água

A massa específica seca do concreto apresentou decréscimo proporcional ao teor de substituição, o que não foi verificado no volume ocupado pelo material sólido no concreto, o que indica uma mudança microestrutural, que foi mais acentuada para o teor de substituição de cimento por CBCA de 10%.



### 5.3.4 Análise de viabilidade econômica

A utilização de cinzas de bagaço de cana-de-açúcar como substituinte parcial de agregado miúdo e cimento Portland pode gerar ganhos econômicos, que irão variar de acordo com o valor atribuído às cinzas, que pode ser representado pelas Equações 22 e 23 propostas pelo autor.

$$P = B + OED + T + Tr + A - D \quad (22)$$

$$C = P + L + U \quad (23)$$

Sendo que:

P: Preço mínimo das cinzas;

B: custo associado ao beneficiamento das cinzas;

OED: custo do acondicionamento para transporte e operações de embarque e desembarque;

T: custo do transporte das cinzas até o ponto de consumo;

A: custos administrativos da produção, estoque e venda das cinzas;

Tr: tributação;

L: lucro das operações envolvidas;

D: valor que seria dispendido para a correta disposição das cinzas caso ela não fosse convertida em produto;

C: custo total acrescentado por aumento na complexidade no uso das cinzas para o consumidor; e

U: custos associados ao aumento na complexidade dos processos para a incorporação das cinzas ao cimento, necessidade de aditivos ou da produção do concreto com as cinzas.

Considerando somente o valor do transporte das cinzas, com base na metodologia de cálculo do preço mínimo do transporte rodoviário de cargas, estabelecido pela Resolução N° 5.820, de 30 de maio de 2018 da ANTT, tem-se que a distância máxima para que o custo das cinzas em estado bruto se equipare ao preço médio do cimento divulgado pelo SINAPI em fevereiro de 2021 é de cerca de 1200km. A Figura 32 mostra a relação entre a distância entre a geração e o consumo com o preço das cinzas, tendo sido utilizados os preços estabelecidos na Tabela 1 do Anexo C, considerando a capacidade dos veículos fornecida na Tabela 2 do Anexo C. O ganho econômico percentual, indicado na Figura 33, foi calculado seguindo a dosagem com a proporção em massa de 1:2:3 (ligante : aglomerante : brita) para o concreto e 1:3 (ligante : aglomerante) para a argamassa, conforme indicado na Tabela 3 do Anexo C, adotando-se os valores médios de transporte. Dado o cenário econômico atual, foi possível identificar que a substituição de cimento por cinzas poderia resultar em ganhos de até 1,5% para substituições de 5%, 2,5% para 10%, 4% para 15% e 5,5% para teores de 20%. Já com a utilização das cinzas como substituinte do agregado miúdo, haveria ganho econômico segundo as metodologias previamente citadas, somente nas regiões em que o frete do agregado superasse o frete das cinzas.

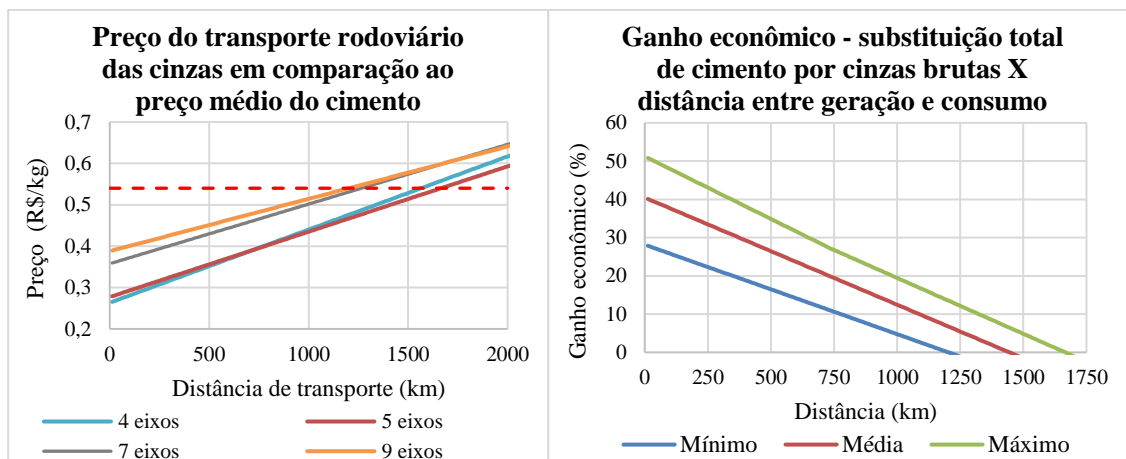


Figura 32: Relação entre o preço de cimento e o preço mínimo da cinza bruta (Gráficos elaborados seguindo os valores do SINAPI, 2021, considerando apenas o transporte no custo da cinza bruta seguindo a Resolução N°5.923 da ANTT, de 18 de janeiro de 2021, Tabelas 1, 2 e 3 do Anexo C)

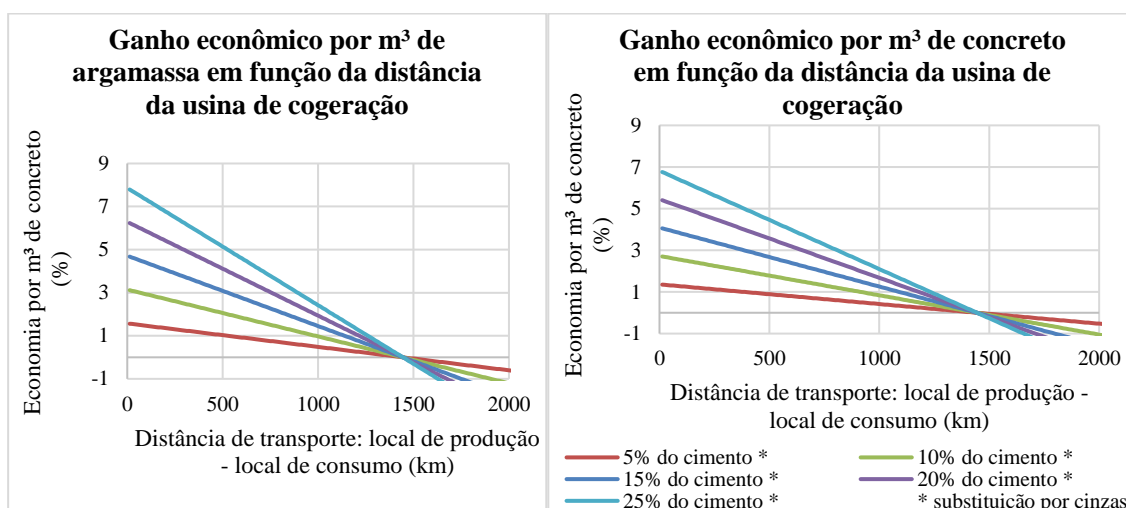


Figura 33: Ganho econômico da utilização das cinzas considerando a distância de transporte (Gráficos elaborados seguindo a Resolução N° 5.923, de 18 de janeiro de 2021 que estabelece valores de frete mínimo e valores dos insumos informados pelo SINAPI (Tabelas 1, 2 e 3 do Anexo C)

A partir da Figura 33, pode-se concluir que maiores teores de substituição de cimento por cinzas geram maiores economias. Entretanto, para que se utilize maiores frações de cinzas, é necessário que a cinza apresente características adequadas, que normalmente são atingidas por aplicação de processos de beneficiamento. Estes processos afetam significativamente o preço final da cinza obtida. Observa-se que o ganho econômico considerando apenas o transporte na composição do preço das cinzas, quando utilizadas pequenas frações de substituição (inferior a 10%), é bastante limitado (ganho máximo de 3%). Sendo assim, o cenário ideal seria realizar a adequação das características das cinzas para o uso de maiores teores de substituição no concreto mediante processos simplificados e de baixo custo, preferencialmente, que utilizem ou adequem a própria infraestrutura já existente nas caldeiras de cogeração ou nas cimenteiras e concreteiras, uma vez que a substituição de frações maiores

de cimento (próximas a 20%) por cinzas sem beneficiamento, geraria economia inferior à 10% no produto final. No entanto, deve-se observar que operações logísticas de grandes volumes de mercadorias, se bem organizadas, podem gerar custos menores que os estimados.

No entanto, as substituições parciais de areia e cimento Portland por cinzas podem alterar a resistência dos concretos obtidos. Em caso de ganhos de resistência, pode-se produzir peças estruturais com menores seções transversais para que resistam aos mesmos esforços que seriam resistidos pelo concreto de referência, enquanto que maiores áreas seriam necessárias caso o concreto resultante apresentasse resistência inferior. Desta maneira, se o concreto resultante cumprir com os pré-requisitos de durabilidade para o uso pretendido, a economia efetiva do uso de cinzas de bagaço de cana-de-açúcar durante a construção pode ser ainda maior.

Considerando elementos estruturais prismáticos de concreto para o cálculo da economia no volume de materiais consumidos, e um limite de substituição de areia e cinzas de 0 à 20%, foram elaborados os gráficos das Figuras 34 e 35. Nelas pode ser analisado o potencial de ganho econômico das cinzas caso elas fossem disponibilizadas à preços que variam de zero a duas vezes o valor do material substituído considerado (areia ou cimento) segundo as Equações de 24 a 27. Foram considerados os potenciais de ganho de resistência de -25% à 25%, por ser a faixa de valores que concentrou grande parte dos resultados encontrados na revisão de literatura (Figura 6).

$$p = SCBA/material = \frac{PSCBA}{P_{material}} \quad (24)$$

$$SCBA/CP = \frac{SCBA}{PCP} \quad (25)$$

$$RV = \left[ \frac{1}{1 + (G/100)} \right] \quad (26)$$

$$Pg = 100 \{RV[(1 - t) + (t \times p)] - 1\} \quad (27)$$

*Sendo:*

*p ou PSCBA/material: relação entre o preço por kg atribuído às cinzas de bagaço de cana-de-açúcar e do material que será substituído (areia ou cimento Portland);*

*PSCBA/CP: relação entre o preço por kg atribuído às cinzas de bagaço de cana-de-açúcar e do cimento Portland;*

*PSCBA: preço por kg das cinzas de bagaço de cana-de-açúcar;*

*P<sub>material</sub>: preço por kg da areia ou do cimento Portland;*

*PCP: preço por kg do cimento Portland;*

*RV: relação volumétrica entre um prisma projetado como concreto convencional e com o concreto com cinzas para resistir à um mesmo esforço;*

*G: ganho de resistência em porcentagem do concreto que utiliza cinzas com relação ao concreto convencional;*

*Pg: potencial de ganho econômico sobre o consumo do material convencional analisado, ocasionado pela utilização de cinzas, e*

*t: teor da substituição do material convencional por cinzas;*

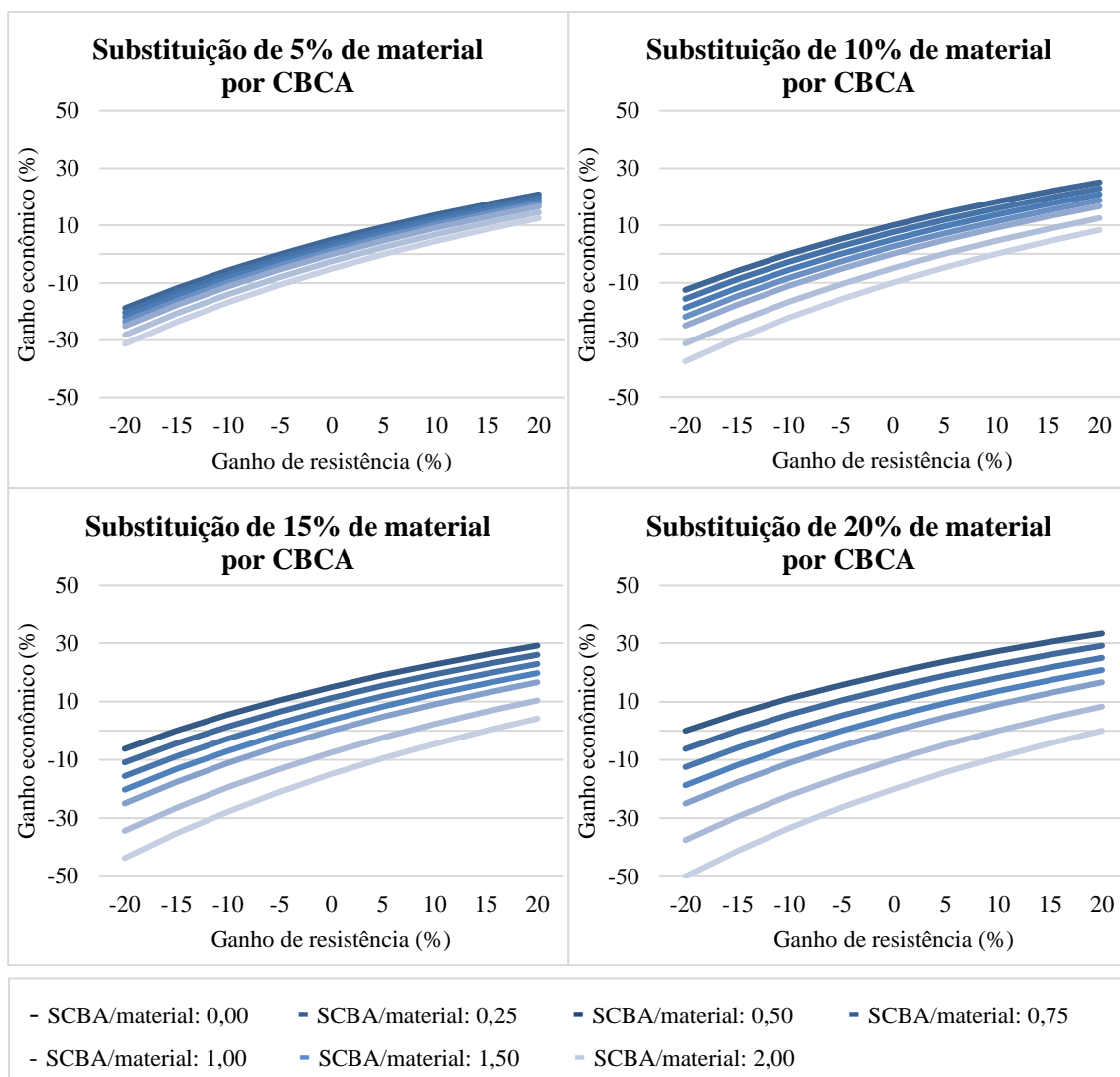


Figura 34: Potencial de ganho econômico no consumo do material substituído (Gráficos elaborados considerando substituições de agregados e cimento no concreto)

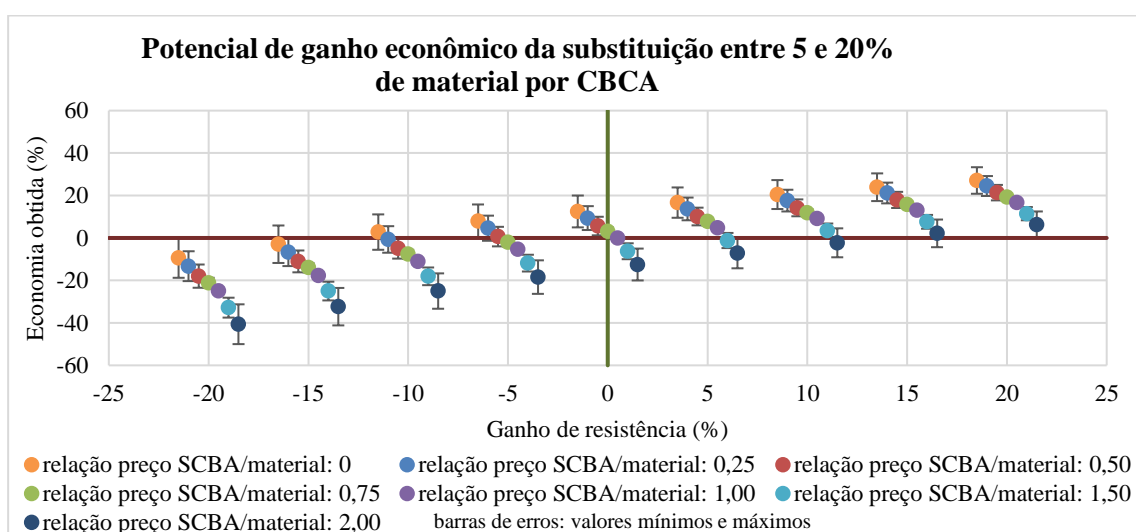


Figura 35: Resumo do potencial de ganho econômico da substituição parcial (Gráficos elaborados considerando ganhos nos valores consumidos de agregados e cimento no concreto)

Conforme apresentado nas Figuras 34 e 35, mesmo se as cinzas estiverem disponíveis à preços superiores ao do material substituído, há potencial de geração de economia dependendo do ganho de resistência gerado por seu uso. De forma análoga, ainda que as cinzas sejam disponibilizadas gratuitamente, considerando o limite de substituição de materiais de até 20%, seu uso é inviável economicamente caso provoque reduções superiores à 20% na resistência do concreto estrutural. Entretanto, estas avaliações não levam em consideração a economia global na construção de um empreendimento, pois o aumento ou redução do peso de um elemento estrutural pode implicar em possibilidade ou necessidade de redimensionamento de outros elementos estruturais ou até mesmo das fundações.

A Figura 36 exhibe o comparativo entre o potencial de ganho econômico do uso de uma mesma cinza para substituição de cimento ou de areia em um concreto de proporção em massa de cimento:areia:brita de 1:2:3. É possível observar que, para um mesmo ganho de resistência, a substituição de cimento Portland é mais rentável que a substituição de areia. Com base nos preços dos insumos (SINAPI, 2021), caso a substituição de areia provoque redução na resistência mecânica que ocasione a necessidade de redimensionamento da peça estrutural, só haveria a possibilidade de ganho econômico se o preço das cinzas para o consumidor for inferior à 9% do preço do cimento Portland. Se o preço das cinzas for igual ao preço do cimento Portland, só haveria possibilidade de ganho econômico na substituição de areia em algumas aplicações em que houvesse ganho de resistência superior à 10%.

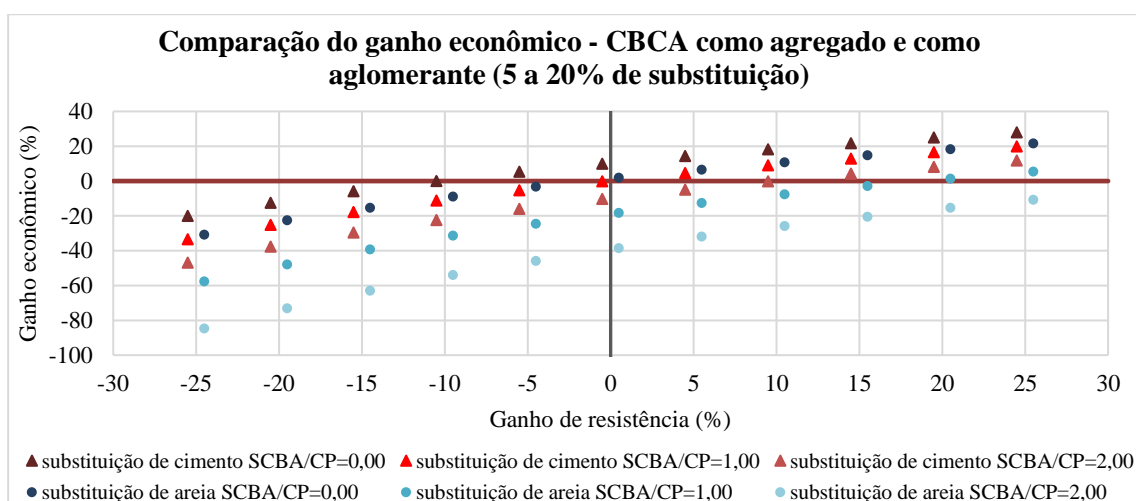


Figura 36: Comparação entre ganhos econômicos da substituição de CP e areia (Gráfico elaborado considerando os preços dos materiais indicados pelo SINAPI 2021 e dosagem do concreto na proporção em massa de 1 de CP : 2 areia média : 3 brita 1)

Analisando os concretos produzidos neste trabalho, tanto na Fase 2 quanto na Fase 3, do ponto de vista econômico, foi possível elaborar a Tabela 18 e as Figuras 37 e 38. Foram

consideradas a faixa de ganho de resistência apresentada pelos concretos, o valor das cinzas variando de 0 a duas vezes o preço do cimento Portland, a possibilidade de redimensionamento das peças de acordo com o ganho de resistência e a situação em que o ganho de resistência não altera a quantidade de concreto consumido.

Tabela 19: Potencial de ganho econômico do uso dos concretos estudados

Substituição	Teor	Adição	Ganho de resistência		Ganho econômico em relação ao preço do concreto convencional								
			inf	Sup	Redimensionamento (menor resistência)			Redimensionamento (maior resistência)			Mesmo consumo de materiais		
					0*	1*	2*	0*	1*	2*	0*	1*	2*
Areia por CBCA	5%	-	-15%	-10%	-17%	-25%	-33%	-10%	-18%	-25%	1%	-6%	-13%
	5%	Crist.	0	5%	1%	-6%	-13%	5,4%	-1%	-7,5%	1%	-6%	-13%
Cimento por CBCA	5%	-	-5%	5%	-1,7%	-5,3%	-8,8%	8%	4,8%	1,6%	3,4%	0%	-3,4%
	10%	-	20%	25%	22,3%	17%	11%	25,4%	20%	14,6%	6,6%	0%	-6,6%
	15%	-	0%	10%	10%	0%	-10%	18,3%	9,1%	-0,1%	10%	0%	-10%

Crist. – cristalizante (Xypex admix 0,8% em relação ao peso do cimento)

\* Valor da relação de preço SCBA/CP: 0 – CBCA fornecida gratuitamente, 1 – CBCA fornecida ao preço do cimento Portland, 2 – CBCA fornecida ao dobro do preço do cimento Portland

A partir das Figuras 36, 37 e 38, é possível observar que, para um mesmo ganho de resistência, a substituição de cimento Portland apresenta maiores possibilidades de ganhos econômicos que a substituição de areia. Com base nos preços dos insumos (SINAPI, 2021), caso a substituição de areia provoque redução na resistência mecânica que ocasione a necessidade de redimensionamento da peça estrutural, só haveria a possibilidade de ganho econômico se o preço das cinzas para o consumidor for inferior à 9% do preço do cimento Portland. Se o preço das cinzas for igual ao preço do cimento Portland, só haveria possibilidade de ganho econômico na substituição de areia em algumas aplicações em que houvesse ganho de resistência superior à 10%. Entretanto, do ponto de vista ambiental, considerando a necessidade de redução no volume de resíduo a ser descartado, substituições de areia podem promover o consumo de maiores volumes de cinzas. Nas Figuras 37 e 38, foram consideradas as condições de potencial de ganho mínimo, médio e máximo, os cenários em que o preço das cinzas assumem os valores de zero, uma e duas vezes o preço do cimento Portland.

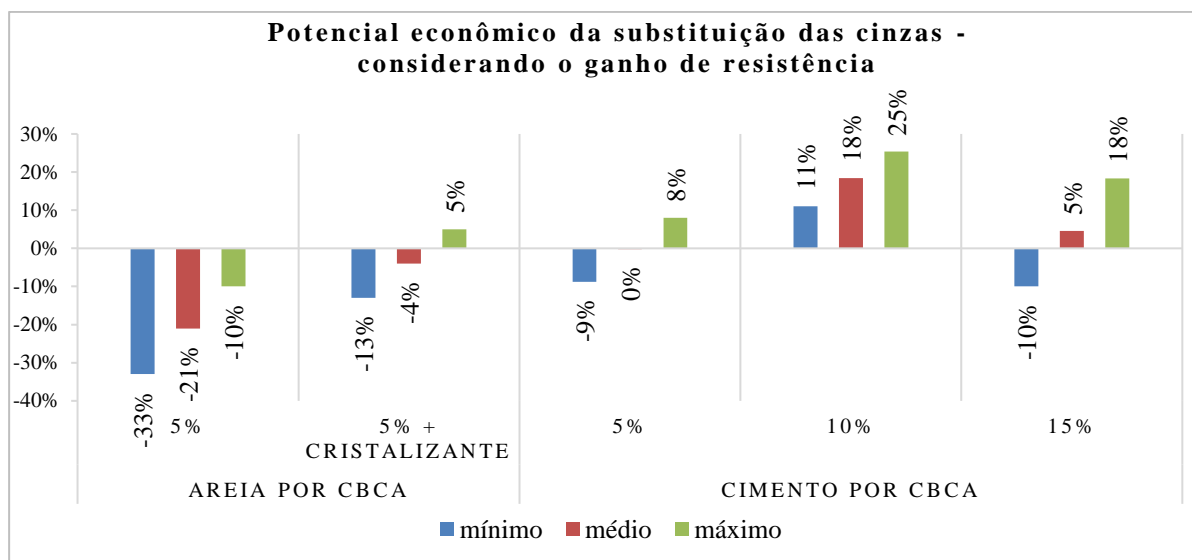


Figura 37: Ganho econômico – considerando ganho de resistência  
(Gráfico elaborado considerando os preços dos materiais indicados pelo SINAPI 2021 para os concretos estudados)

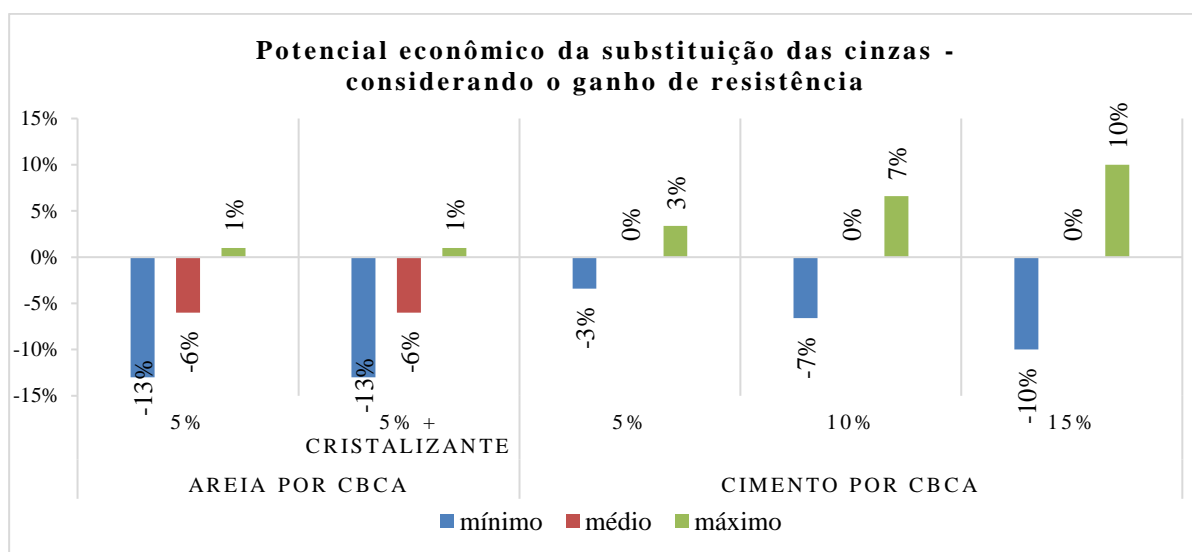


Figura 38: Ganho econômico – mantendo o volume consumido  
(Gráfico elaborado considerando os preços dos materiais indicados pelo SINAPI 2021 para os concretos estudados)

Se não houver redimensionamento da peça estrutural, qualquer substituição de cimento Portland por CBCA ocasiona ganhos econômicos desde que as cinzas sejam disponibilizadas à preços inferiores ao preço do cimento. Para os concretos estudados de substituição de cimento por cinzas, o não redimensionamento não comprometeria a estrutura do ponto de vista de resistência à compressão (todos apresentaram resistência igual ou superior), nem do ponto de vista de resistência à tração (todos apresentaram resistência superior). O único quesito que deve ser avaliado é o módulo de elasticidade, que apresentou valores inferiores ao do concreto de

referência, entretanto os valores foram superiores aos valores utilizados em estimativas para cálculo estrutural.

Havendo redimensionamento estrutural, de acordo com que o ganho de resistência à compressão, tração e os valores de módulo de elasticidade podem permitir, os ganhos econômicos são potencializados. A substituição de 10% de cimento por cinzas geraria economia mesmo que as cinzas fossem disponibilizadas ao dobro do preço do cimento. A economia máxima com relação ao preço e consumo do concreto de referência que se poderia obter com as substituições de 5, 10 e 15% são, respectivamente, de 8, 25 e 18%.



## 6 CONCLUSÕES

A partir do trabalho elaborado é possível concluir que:

- cinzas oriundas de processos industriais apresentam composições químicas que seguem padrões estatísticos diferentes das cinzas produzidas sob condições de calcinação controlada;
- em uma mesma indústria, durante uma mesma safra, há grande variação na composição granulométrica e na qualidade da queima dos bagaços de cana-de-açúcar, sendo necessário um mínimo de padronização das cinzas para o uso em concreto, que pode ser melhorado aplicando-se o peneiramento;
- quando utilizadas cinzas cujo  $d_{50} < 45\mu\text{m}$ ,  $\text{LOI} < 20\%$  e óxidos pozzolânicos  $> 60\%$  em massa, há potencial para ganho de resistência em substituições de cimento de até 20%.
- a substituição de 5% de areia por cinzas brutas resultou em perda de cerca de 15% da resistência mecânica, que pode ser compensada pela adição de cristalizante;
- a substituição de areia gera a possibilidade de emprego de maiores volumes de cinzas, podendo ser considerada como uma alternativa à disposição deste material como resíduo, no entanto, apresenta menores possibilidades de ganho econômico quando comparada à substituição do cimento;
- ainda que as cinzas sejam disponibilizadas à preços superiores ao do material que será substituído, é possível que haja ganhos econômicos na substituição, o que pode viabilizar processos de beneficiamento das cinzas;
- maiores teores de substituição podem gerar maiores ganhos econômicos, desde que não acarretem em perdas de resistência superior à 20%;
- a resistência à compressão, para a dosagem estudada, não se altera quando 5 ou 15% do cimento Portland é substituído por cinzas brutas de bagaço de cana-de-açúcar, já quando 10% de substituição é utilizada, a resistência aumenta em 25%.
- concretos que empregaram substituições de cimento por cinzas apresentaram valores para o módulo de elasticidade entre 15 e 40% maiores que os valores estimados seguindo as metodologias NZS3101, IS456, ACI318, AS3600 e NBR6118, no entanto 20% menores que o apresentado pelo concreto de referência;

- todos os concretos produzidos neste trabalho apresentaram índice de vazios e taxa de absorção inferiores à 20 e 10%, respectivamente, sendo indicativo de boa durabilidade;
- havendo redimensionamento estrutural, de acordo com que o ganho de resistência à compressão, tração e os valores de módulo de elasticidade podem permitir, a substituição de 10% de cimento por cinzas geraria economia mesmo que as cinzas fossem disponibilizadas ao dobro do preço do cimento; e
- a economia máxima com relação ao preço e consumo do concreto de referência que se poderia obter com as substituições de 5, 10 e 15% são, respectivamente, de 8, 25 e 18%.

## **7 PROPOSTAS PARA ESTUDOS FUTUROS**

Propõe-se o desenvolvimento de métodos de avaliação das cinzas para uso em concreto que suplantem a necessidade de classificação do material como pozolana. Uma vez que, como corroborado pela revisão e pela pesquisa, embora o material, normalmente, não apresente características pozolânicas, seu uso pode ser ambiental, econômica e tecnicamente viável dentro de uma faixa de substituição limitada.

Outro campo que pode ser explorado é a análise de potencial econômico em edificações, posto que a redução ou aumento nas seções transversais de elementos estruturais alteram seu peso próprio e colaboram para alteração em custos nos elementos que os sustentam e nas fundações. Desta forma o potencial de economia global do uso de materiais cimentícios complementares e suplementares pode ser aumentado. Também é sugerido que se averigue a produção do concreto em escala real para que se verifique os custos adicionais devido ao aumento da complexidade dos processos envolvidos ao adicionar um material na cadeia produtiva e pela perda de trabalhabilidade do concreto produzido.

Sugere-se que se estude a capacidade de absorção de água das cinzas, para verificar se ela deve ser introduzida seca ou úmida nas dosagens e quais correções no teor a/c poderiam ser realizadas a fim de que se possa incorporar maiores quantidades de cinza sem que ocorra perdas nas características físico-químicas e mecânicas do concreto. Nesta linha, também propõe-se estudar a interação de aditivos superplastificantes com as cinzas e os efeitos no concreto de referência de adições superiores às normalmente empregadas.

Propõe-se que seja estudada a durabilidade de concretos que empregam as cinzas submetidos a longos períodos de exposição às intempéries e condições adversas.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ABBAS, S.; SHARIF, A.; AHMED, A.; ABBASS, W.; SHAUKAT, S. Prospective of sugarcane bagasse ash for controlling the alkali-silica reaction in concrete incorporating reactive aggregates. *Structural Concrete*, v. 21, p. 781-793. 2020. DOI: 10.1002/suco.201900284
- ACI 318-14, Building Code Requirements for Structural Concrete and Commentary, American Concrete Institute, Farmington Hills, MI 48331, U.S.A., 2014.
- ALMEIDA, F. C. R.; SALES, A.; MORETTI, J. P.; MENDES, P. C. D. Sugarcane bagasse ash sand (SCBAS): Brazilian agroindustrial by-product for use in mortar. *Construction and Building Materials*. V. 82, p. 31-38. 2015. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2015.02.039.
- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. ASTM C267 -20: Standard Test Methods fo Chemical Resistance of Morthars, Grouts, and Monolithic Surfacing and Polymer Concrets. West Conshohocken, PA, USA, 2020. 7p.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 5738: Concreto - Procedimento para moldagem e cura de corpos de prova. Rio de Janeiro, 2016. 9p.
- NBR 5739: Concreto – Ensaio de compressão de corpos-de-prova cilíndricos. Rio de Janeiro, 2018. 9p.
  - NBR 5752: Materiais pozolânicos – Determinação do índice de desempenho com cimento Portland aos 28 dias. Rio de Janeiro, 2014. 4p.
  - NBR 6118: Projeto de estruturas de concreto – Procedimento. Rio de Janeiro, 2014, 238p.
  - NBR 7215: Cimento Portland - Determinação da resistência à compressão de corpos de prova cilíndricos. Rio de Janeiro, 2019. 12p.
  - NBR 8522: Concreto – Determinação dos módulos estáticos de elasticidade e de deformação à compressão. Rio de Janeiro, 2017. 20p.
  - NBR 9778: Argamassa e concreto endurecidos – Determinação da absorção de água, índice de vazios. Rio de Janeiro, 2009. 4p.
  - NBR 11579: Cimento Portland – Determinação do índice de finura por meio da peneira 75µm (nº 200). Rio de Janeiro, 2013. 4p.
  - NBR 12653: Materiais pozolânicos – Requisitos. Rio de Janeiro, 2015. 6p.
  - NBR 16605: Cimento Portland e outros materiais em pó — Determinação da

- massa específica. Rio de Janeiro, 2017. 4p.
- NBR 16697: Cimento Portland – Requisitos. Rio de Janeiro, 2018. 12p.
- NBR 16889: Concreto: Determinação da consistência pelo abatimento do tronco de cone. Rio de Janeiro, 2020. 5p.
- NBR NM 45: Agregados – Determinação da massa unitária e do volume de vazios. Rio de Janeiro, 2006. 8p.
- NBR NM 52: Agregado miúdo - Determinação da massa específica e massa específica aparente. Rio de Janeiro, 2009. 6p.
- NBR NM 53: Agregado graúdo - Determinação de massa específica, massa específica aparente e absorção de água. Rio de Janeiro, 2009. 8p.
- NBR NM 248: Agregados - Determinação da composição granulométrica. Rio de Janeiro, 2003. 6p.

AKKARAPONGTRAKUL, A.; JULPHUNTHONG, P.; NOCHAIYA, T. Setting time and microstructure of Portland cement-bottom ash-sugarcane bagasse ash pastes. *Monatsh Chem*, V. 148, p. 1355-1362. 2017. DOI: 10.1007/s00706-017-1953-5

AKRAM, T.; MEMON, S. A.; OBAID, H. Production of self compacting concrete using bagasse ash. *Construction and Building Materials*. V. 23, p. 703-712. 2009. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2008.02.012

ALMEIDA, F. C. R.; SALES, A.; MORETTI, J. P.; MENDES, P. C. D. Sugarcane bagasse ash sand (SBAS): Brazilian agroindustrial by-product for use in mortar. *Construction and Building Materials*. V. 82, p. 31-38. 2015. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2015.02.039

ANDREÃO, P. V.; SULEIMAN, A. R.; CORDEIRO, G. C.; NEHDI, M. L. Beneficiation of sugarcane bagasse ash: pozzolanic activity and leaching behaviour. V. 11, p.4393-4402. 2019. DOI: 10.1007/s12649-019-00721-x

ARENAS-PIEDRAHITA, J. C.; MONTES-GARCÍA, P.; MENDONZA-RANGEL, J. M.; CALVO, H. Z. L.; VALDEZ-TAMEZ, P. L.; MARTÍNEZ-REYES, J. Mechanical and durability properties of mortars prepared with untreated sugarcane bagasse ash and untreated fly ash. *Construction and Building Materials*. V. 105, p. 69-81. 2016. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2015.12.047

ARIF, E.; CLARCK, M. W.; LAKE, N. Sugar cane bagasse ash from a high efficiency co-

generation boiler: Applications in cement and mortar production. *Construction and Building Materials*. V. 128, p. 287-297. 2016. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2016.10.091

AS 3600-2009, Concrete structures, Standards Australia 2009.

AZMATULLAH, A. A.; KHAN, I. Use of sugarcane bagasse ash as a partial replacement of cement in concrete. *Journal of mechanics of continua and mathematical sciences*, v. 14, n°2, p. 72-86, 2019. DOI: 10.26782/jmcms.2019.04.00006

BAHURUDEEN, A.; KANRAJ, D.; DEV, V. G.; SANTHANAM, M. Performance evaluation of sugarcane bagasse ash blended cement in concrete. *Cement & Concrete Composites*. V. 59, p. 77-88. 2015. DOI: 10.1016/j.cemconcomp.2015.03.004

BAHURUDEEN, A.; MARCKSON, A. V.; KISHORE, A.; SANTHANAM, M. Development of sugarcane bagasse ash based Portland pozzolana cement and evaluation of compatibility with superplasticizers. *Construction and Building Materials*, v. 68, p. 465-475. 2014. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2014.07.013

BAHURUDEEN, A.; WANI, K.; BASIT, M. A.; SANTHANAM, M. Assesment of pozzolanic performance of sugarcane bagasse ash. *Journal of Materials in Civil Engineering*, v. 28, n°2, 04015095 1-11. 2016. DOI: 10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0001361

BATOOL, F.; MASOOD, A.; ALI, M. Characterization of sugarcane bagasse ash as pozzolan and influence on concrete properties. *Arabian Journal for Science and Engineering*. V. 45, p. 3891-3900. 2020. DOI: 10.1007/s13369-019-04301-y

BERENGUER, R. A.; SILVA, F. A. N.; MONTEIRO, E. C. B.; LINS, C. S.; LIMA, A. Effect of sugarcane bagasse ash as partial replacement of cement on mortar mechanical properties. *Electronic Journal of Geotechnical Engineering*. V.21, p. 4577-4586. 2016.

BRAZ, I. G.; SHINZATO, M. C.; MONTANHEIRO, T. J.; ALMEIDA, T. M.; CARVALHO, F. M. S. Effect of the addition of aluminium recycling waste on the pozzolanic activity of sugarcane bagasse ash and zeolite. *Waste and Biomass Valorization*, v. 10, p. 3493-3513. 2019. DOI: 10.1007/s12649-018-0342-6

CAPPELLESSO, V. G. Uso de impermeabilizante por cristalização para redução da permeabilidade do concreto. Monografia (Trabalho de conclusão do curso de engenharia

- civil) Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre, 2016. 141p.
- CASTALDELLI, V. N.; MORAES, J. C. B.; AKASKI, J. L.; MELGES, J. L. P.; MONZÓ, J.; BORRACHERO, M. V.; SORIANO, I.; PAYÁ, J.; TASHIMA, M. M. Study of the binary system fly ash/sugarcane bagasse ash (FA/SCBA) in Si<sub>2</sub>/K<sub>2</sub>O alkali-activated binders. *Fuel*, v.174, p. 307-316, 2016. DOI: 10.1016/j.fuel.2016.02.020
- CASTRO, T. R.; MARTINS, C. H. Avaliação da adição de cinzas do bagaço de cana-de-açúcar em argamassas mistas. *Ambiente Construído*. V. 16, nº3, p. 137-151. 2016. DOI: 10.1590/s1678-86212016000300097
- CHI, M.; HUANG, R.; YEIH, W. Physical and mechanical properties of cement-based composites with bagasse ash. *Journal of Marine Science and Technology*. V. 23, nº 1, p. 1-7. 2015. DOI: 10.6119/JMST-013-0717-1
- CHUSILP, N.; JATURAPITAKKUL, C.; KIATTIKOMOL, K. Utilization of bagasse ash as a pozzolanic material in concrete. *Construction and Building Materials*. V. 23, p. 3352-3358. 2009. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2009.06.030
- CONAB, Companhia Nacional de Abastecimento. Acompanhamento da safra brasileira: cana-de-açúcar safra 2020/21 N.3 - Terceiro levantamento. Dezembro de 2020. Disponível em: <https://www.conab.gov.br/info-agro/safras/cana>.
- CONDÉ, L. F. O. S. Análise do desempenho de superfícies protetoras em concretos submetidos a ataques por cloretos. Dissertação de Mestrado em Construção Civil. Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, MG. 134f. Dezembro de 2016.
- CORDEIRO, G. C.; TOLEDO FILHO, R. D.; FAIRBAIRN, E. M. R. Characterization of sugar cane bagasse ash for use as pozzolan in cementitious materials. *Quim. Nova*, Vol. 32, No. 1, 82-86, 2009.
- CORDEIRO, G. C.; PAIVA, O. A.; TOLEDO FILHO, R. D.; FAIRBAIRN, E. M. R.; TAVARES, L. M. Long-term compressive behaviour of concretes with sugarcane bagasse ash as a supplementary cementitious material. V. 46, nº2, p. 564-573. 2018. DOI: 10.1520/JTE20160316
- CORDEIRO, G. C.; TOLEDO FILHO, R. D.; TAVARES, L. M.; FAIRBAIRN, E. M. R.

- Experimental characterization of binary and ternary blended-cement concretes containing ultrafine residual rice husk and sugar cane bagasse ashes. *Construction and Building Materials*. V. 29, p. 641-646. 2012. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2011.08.095
- CORDEIRO, G. C.; TOLEDO FILHO, R. D.; TAVARES, L. M.; FAIRBAIRN, E. M. R. Ultrafine grinding of sugar cane bagasse ash for application as pozzolanic admixture in concrete. *Cement and Concrete Research*. V. 39, p. 110-115. 2008. DOI:10.1016/j.cemconres.2008.11.005
- DE PAULA, M. O.; TINÔCO, I. F. F.; RODRIGUES, C. S.; SARAZ, J. A. O. Sugarcane bagasse ash as a partial Portland cement replacement material. V. 77, nº 163, p.47-54. 2010.
- DEBBARMA, S., G. D.; RANSINCHUNG, R. N.; SINGH, S.; SAHDEO, S. K. Utilization of industrial and agricultural wastes for production of sustainable roller compacted concrete pavement mixes containing reclaimed asphalt pavement aggregates. *Resources, Conservation & Recycling*, v. 152, 104504, 14p. 2020. DOI: 10.1016/j.resconrec.2019.104504
- DEEPIKA, S.; ANAND, G.; BAHURUDEEN, A.; SANTHANAM, M. Construction Products with Sugarcane Bagasse Ash Binder. *Journal of Materials and Civil Engineering*. V. 29, nº 10, 10p. DOI: 10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0001999
- FERREIRA, T. L. Influência da requeima na pozolanicidade de cinzas de bagaço de cana-de-açúcar de diferentes características. Dissertação do Curso de Mestrado em Materiais em Construção Civil, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, MG. 80f. 2015.
- FIGUEIREDO, R. L.; PAVÍA, S. A study of the parameters that determine the reactivity of sugarcane bagasse ashes (SCBA) for use as a binder in construction. *SN Applied Sciences*, v. 2: 1515, 15p. 2020. DOI: 10.1007/s42452-020-03224-w
- FRANCO-LUJÁN, V. A.; MALDONADO-GARCÍA, M. A.; MENDOZA-RANGEL, J. M.; MONTES-GARCÍA, P. Chloride-induced reinforcing steel corrosion in ternary concretes containing fly ash and untreated sugarcane bagasse ash. *Construction and Building Materials*, v. 198, p. 608-618. 2019. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2018.12.004
- FRÍAS, M.; VILLAR, E.; SAVASTANO, H. Brazilian sugar cane bagasse ashes from the cogeneration industry as active pozzolans for cement manufacture. *Cement & Concrete*



- Composites. V. 33, p. 490-496. 2011. DOI: 10.1016/j.cemconcomp.2011.02.003
- GANESAN, K.; RAJAGOPAL, K.; THANGAVEL, K. Evaluation of bagasse ash as supplementary cementitious material. *Cement and Concrete Composites*. V. 29, p. 515-524. 2007. DOI: 10.1016/j.cemconcomp.2007.03.001
- GAR, P. S.; SURESH, N.; BINDIGANVILE. Sugar cane bagasse ash as a pozzolanic admixtures in concrete for resistance to sustained elevated temperatures. *Construction and Building Materials*. V. 153, p. 929-936. 2017. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2017.07.107
- GONZÁLEZ-KUNZ, R. N.; PINEDA, P.; BRAS, A.; MORILLAS, L. Plant biomass ashes in cement-based building materials. Feasibility as eco-efficient structural mortars and grouts. *Sustainable Cities and Society*. V. 31, p. 151-172. 2017. DOI: 10.1016/j.scs.2017.03.001
- HERNÁNDEZ, J. F. M.; MIDDENDORF, B.; GEHRKE, M.; BUDELMANN, H. Use of wastes of the sugar industry as pozzolana in lime-pozzolana binders: study of the reaction. *Cement and Concrete Research*. V. 28, n° 11, p. 1525-1536. 1998.
- HUSSEIN, A. A. E.; SHAFIQ, N.; NURUDDIN, M. F.; MEMON, F. A. Compressive strength and microstructure of sugar cane bagasse ash concrete. *Research Journal of Applied Sciences, Engineering and Technology*. V. 7, n°12, p. 2569-2577. 2014. DOI: 10.19026/rjaset.7.569
- IEA. Cement Technology Roadmap Plots Path to Cutting CO<sub>2</sub> Emissions 24% by 2050. Available online: <https://www.iea.org/newsroom/news/2018/april/cement-technology-roadmap-plots-path-to-cutting-co2-emissions-24-by-2050.html> (accessed on 26 October 2021).
- INDIAN STANDARD. IS: 1727 – Methods of Test for Pozzolanic Materials, New Delhi. 2004, 55p.
- INDIAN STANDARD. IS 456 - Plain and Reinforced Concrete - Code of Practice, New Delhi. 2000, 114p.
- IUPAC, 2001. Manual of symbols and terminology for physicochemical quantities and units. Appendix II: definitions, terminology and symbols in colloid surface chemistry. Pure

Appl. Chem. 78 <https://doi.org/10.1351/pac197951051213>.

- JAGADESH, P.; RAMACHANDRAMURTHY, A.; MURUGESAN, R. Evaluation of mechanical properties of sugar cane bagasse ash concrete. *Construction and Building Materials*. V. 176, p. 608-617. 2018. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2018.05.037
- JAVED, M. F.; AMIN, M. N.; SHAH, M. I.; KHAN, K.; IFTIKHAR, B.; FAROOQ, F.; ASLAM, F.; ALYOUSEF, R.; ALABDULJABBAR, H. Applications of gene expression programming and regression techniques for estimating compressive strength of bagasse ash based concrete. *Crystals*. V. 10, 737. 17p. 2020. DOI: 10.3390/cryst10090737
- 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. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2017.07.041
- KATARE, V. D.; MADURWAR, M. V. Experimental characterization of sugarcane biomass ash – A review. *Construction and Building Materials*, v. 152, p. 1-15. 2017. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2017.06.142.
- KAZMI, S. M. S.; MUNIR, M. J.; PATNAIKUNI, I.; WU, Y. F. Pozzolanic reaction of sugarcane bagasse ash and its role in controlling alkali silica reaction. *Construction and Building Materials*. V. 148, p. 231-240. 2017. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2017.05.025
- KUMAR, D. S. S.; CHETHAN, K.; KUMAR, B. C. Effect of elevated temperatures on sugarcane bagasse ash-based alkali-activated slag concrete. *Sugar Tech*, September 2020. DOI: 10.1007/s12355-020-00898-9.
- LE, D-H.; SHEEN, Y-N.; LAM, M. N-T. Fresh and hardened properties of self-compacting concrete with sugarcane bagasse ash-slag blended cement, v. 185, p. 138-147, 2018. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2018.07.029
- LUXAN, M.P.; MADRUGA, F.; SAAVEDRA, J. Rapid evaluation of pozzolanic Fig. 8. TG, DTG and DTA curves for FA10 paste cured at 40°C for 48 h. 48 J. Paya et al. / *Cement and Concrete Research* 31 (2001) 41±49 activity of natural products by conductivity measurement, *Cem. Concr. Res.* 19 (1989) 63± 68.
- MADURWAR, M.; SAKHARE, V.; RALEGAONKAR, R. Suitability and sustainability of

- sugarcane bagasse ash bricks. *Engineering Sustainability*, v. 171: ES3, 2016. DOI: 10.1680/jensu.15.00044
- MALDONADO-GARCÍA, M. A.; HERNÁNDEZ-TOLEDO, U. I.; MONTES-GARCÍA, P.; VALDEZ-TAMEZ, P. L. The influence of untreated sugarcane bagasse ash on the microstructural and mechanical properties of mortar. *Materiales de Construcción*. V. 68, nº 329, 13p. 2018. DOI: 10.3989/mc.2018.13716
- MO, K. H.; ALENGARAM, U. J.; JUMAAT, M. Z.; YAP, S. P.; LEE, S. C. Green concrete partially comprised of farming waste residues: a review. *Journal of Cleaner Production*. V. 117, p. 122-138. 2016. DOI: 10.1016/j.jclepro.2016.01.022
- MODANI, P. O.; VYAWAHARE, M. R. Utilization of bagasse ash as a partial replacement of fine aggregate in concrete. Chemical, civil and mechanical engineering tracks of 3rd Nirma University Conference on Engineering. V. 51, p.25-29. 2013. 10.1016/j.proeng.2013.01.007
- MOLIN FILHO, R. G. D.; LONGHI, D. A.; SOUZA, R. C. T.; FERRER, M. M.; VANDERLEI, R. D.; PARAÍSO, P. R.; JORGE, L. M. M. Self-compacting mortar with sugarcane bagasse ash: development of a sustainable alternative for Brazilian civil construction. *Environmental Development Sustainable*, v. 21, p. 2125-2143. 2019. DOI: 10.1007/s10668-018-0127-x
- MOREIRA, H. P.; FIGUEIREDO, E. P.; HELENE, P. R. L. Avaliação da influência de alguns agentes agressivos na resistência à compressão de concretos amassados com diferentes tipos de cimentos brasileiros. *Boletim Técnico da Escola Politécnica da USP, São Paulo*, 2001. 16p.
- MORETTI, J. P.; SALES, A.; ALMEIDA, F. C. R.; REZENDE, M. A. M.; GROMBONI, P. P. Joint use of construction waste (CW) and sugarcane bagasse ash sand (SCBAS) in concrete. *Construction and Building Materials*, v. 113, p. 317-323. 2016. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2016.03.062
- MORETTI, J. P.; SALES, A.; QUARCIONI, V. A.; SILVA, D. C. B.; OLIVEIRA, M. C. B.; PINTO, N. S.; RAMOS, L. W. S. L. Pore size distribution of mortars produced with agroindustrial waste. *Journal of Cleaner Production*. V. 187, p. 473-484. 2018. DOI: 10.1016/j.jclepro.2018.03.219

- MURUGESAN, T.; VIDJEAPRIYA, R. BAHURUDEEN, A. Sugarcane bagasse ash-blended concrete for effective resource utilization between sugar and construction industries. *Sugar tech.* V.22, n°5, p. 858-869. 2020
- NASCIMENTO, P. R. S; PEREIRA, B. C. G.; JOFFILY, I. A. L. Os efeitos de diferentes aditivos cristalizantes nas propriedades do concreto no estado endurecido: absorção de água por capilaridade e resistência à compressão. In: 58° Congresso Brasileiro do Concreto, 2017, Bento Gonçalves. *Anais do 58° Congresso Brasileiro do Concreto.* São Paulo: Ibracon, 2017.
- NASIM, M.; DEWANGAN, U. K.; DEO, S. V. Effect of crystalline admixture, fly ash, and PVA fiber on self-healing capacity of concrete. *Materials Today: Proceedings*, 2020. DOI: 10.1016/j.matpr.2020.04.062
- NEVILLE, A. M. *Propriedades do Concreto.* São Paulo. Editora PINI, 1997.
- NOVA ZELÂNDIA. *The design of concrete structures (part-1) and commentary on the design of concrete structures (part2)*, NZS: 1995, Wellington, New Zealand.
- OTUOZE, H. S.; AMARTEY, Y. D.; SADA, B. H.; AHMED, H. A.; SANNI, M. I.; SULEIMAN, M. A. Characterization of sugar cane bagasse ash and ordinary Portland cement blends in concrete. *Concrete In: Laryea, S., Agyepong, S.A., Leiringer, R. and Hughes, W. (Eds) Procs 4th West Africa Built Environment Research (WABER) Conference, 24-26 July 2012, Abuja, Nigeria, 1231-1237.*
- 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. DOI: 10.1016/j.jclepro.2016.02.013
- PAYÁ, J.; BORRACHERO, M. V.; MONZÓ, J.; PERIS-MORA, E.; AMAHJOUR, F. Enhanced conductivity measurement techniques for evaluation of fly ash pozzolanic activity. *Cemente and Concrete Research*, V. 31, p. 41-49. (2001)
- PEREIRA, A. M.; MORAES, J. C. B.; MORAES, M. J. B.; AKASAKI, J. L.; TASHIMA, M. M.; SORIANO, L.; MONZÓ, J.; PAYÁ, J. Valorisation of sugarcane bagasse ash (SCBA) with high quartz content as pozzolanic material in Portland cement mixtures. *Materials de Construcción.* V. 68, n°330, 10p. 2018. DOI: 10.3989/mc.2018.00617

- POLESELLO, E.; MAUS, M. A influência do aditivo cristalizante nas propriedades do concreto endurecido. *Revista Tecnologia e Tendências*, a. 11, n. 1, p. 14-36. 2020. DOI: 10.25112/rtt.v11i1.1986
- PRAVEENKUMAR, S.; SANKARASUBRAMANIAN, G. Mechanical and durability properties of bagasse ash-blended high-performance concrete. *SN Applied Sciences*, v. 1:1664, 7p. 2019. DOI: 10.1007/s42452-019-1711-x
- PREDAJAS, C.; RAHHAL, V.; TALERO, R. Determination of characteristic rheological parameters in Portland cement pastes. *Construction and Building Materials*. V 51, p 484-491. 2014. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2013.10.004
- RAJASEKAR, A.; ARUNACHALAM, K.; KOTTAISAMY, M.; SARASWATHY, V. Durability characteristics of ultra high strength concrete with treated sugarcane bagasse ash. *Construction and Building Materials*. V. 171, p. 350-356. 2018. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2018.03.140
- RASI, J. R.; BERNARDO, J.; PELLOSO, J. A. C. Avaliação de um secador de bagaço de cana com dois estágios de secagem que utiliza calor residual de um gerador de vapor: um estudo de caso/ Evaluation of two stage bagasse dryer using the waste heat from of a steam generator: a case study. *Brazilian Journal of Development*. V. 6, n. 8. 21p. 2020. DOI: 10.34117/bjdv6n8-155
- REDDY, M. V. S.; ASHALATHA, K.; SUMALATHA, P. Utilization of sugarcane bagasse ash (SCBA) in concrete by partial replacement of cement. *Journal of Mechanical and Civil Engineering*. V. 12, nº6. VI, p. 12-16. 2015. DOI: 10.9790/1684-12661216
- RERKPIBOON, A.; TANGCHIRAPAT, W.; JATURAPITAKKUL, C. Strength chloride resistance, and expansion of concretes containing ground bagasse ash. *Construction and Building Materials*. V. 101, p. 983-989. 2015. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2015.10.140
- RÍOS-PARADA, V.; JIMÉNEZ-QUERO, V. G.; VALDEZ-TAMEZ, P. L.; MONTES-GARCÍA, P. Characterization and use of na untreated Mexican sugarcane bagasse ash as supplementary material for the preparation of ternary concretes. *Construction and Building Materials*. V. 157, p. 83-95. 2017. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2017.09.060
- RODIER, L.; VILLAR-COCINA, E.; BALLESTEROS, J. M. Potential use of sugarcane bagasse

and bamboo leaf ashes for elaboration of green cementitious materials. *Journal of Cleaner Production*, v. 231, p. 54-63, 2019. DOI: 10.1016/j.jclepro.2019.05.208

RUKZON, S.; CHINDAPRASIRT, P. Utilization of bagasse ash in high-strength concrete. *Materials and Design*. V. 34, p. 45-50. 2012. DOI: 10.1016/j.matdes.2011.07.045

SALES, A.; LIMA, S. A. Use of Brazilian sugarcane bagasse ash in concrete as sand replacement. *Waste Management*. V. 30, p. 1114-1122. 2010. DOI: 10.1016/j.wasman.2010.01.026

SAMPAIO, Z. L. M.; SOUZA, P. A. B. F.; GOUVEIA, B. G. Analysis of the influence of the sugar cane bagasse ashes on mechanical behaviour of concrete. *IBRACON Estrut. Mater*. V. 7, nº 4, p. 626-647. 2014. DOI: 10.1590/S1983-41952014000400006

SILVA, R. G.; BORTOLETTO, M.; BOGOTTO, S. A. M.; AKASAKI, J. L.; SORIANO, L.; TASHIMA, M. Effect of wastes from sugar cane industry on the mechanical and hydraulic properties of pervious concrete. *Road Materials and Pavement Design*. Ahead of Print. 18p. 2021. DOI: 10.1080/14680629.2021.1927156

SINAPI – Sistema Nacional de Pesquisa de Custos e Índices da Construção Civil. Preço de Insumos – Pesquisa do IBGE para o mês de fevereiro de 2021, no município de Belo Horizonte. 2021 149p.

SCHETTINO, M. A. S.; HOLANDA, J. N. F. Processing of porcelain stoneware tile using sugarcane bagasse ash waste. *Processing and Application of Ceramics*, v. 9, nº 1, p. 17-22. 2015. DOI: 10.2298/PAC1501017S

SHAMSAEI, E.; BOLT, O.; DE SOUZA, F. B.; BENHELAL, E.; SAGOE-CRENTSIL, K.; SANJAYAN, J. Pathways to Commercialisation for Brown Coal Fly Ash-Based Geopolymer Concrete in Australia. *Sustainability*, V. 13, ed. 8. 2021. 17p. DOI: 10.3390/su13084350

SHOLEH, M.; ROCHMADI, R.; BUDHJANTO, B. Synthesis of precipitated silica from bagasse ash as reinforcing filler in rubber. *IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering* 778 (2020) 012012. DOI:10.1088/1757-899X/778/1/012012

SILVA, G. J. B. Estudo do Comportamento do Concreto de Cimento Portland produzido com a

Adição do Resíduo de Polimento do Porcelanato. Dissertação de Mestrado em Engenharia Metalúrgica e de Minas. Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, MG.107f. Fevereiro de 2005.

SILVA, M. B.; MORAIS, A. S. Avaliação energética do bagaço de cana em diferentes níveis de umidade e graus de compactação. XXVIII Encontro Nacional de Engenharia de Produção. Rio de Janeiro, Brasil. 9p. 2008.

SINGH, S. G. D.; RANSINCHUNG, R. N.; DEBBARMA, S.; KUMAR, P. Utilization of reclaimed asphalt pavement aggregates containing waste from sugarcane mill for production of concrete mixes. *Journal of Cleaner Production*, v. 174, p. 42-52, 2018. DOI: 10.1016/j.jclepro.2017.10.179

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 SiO<sub>2</sub>. *Cement and Concrete Composites*. V. 71, p. 20-25. 2016. DOI: 10.1016/j.cemconcomp.2016.04.005

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. DOI: 10.1016/j.jclepro.2013.06.009

TORRES, S. M.; LIMA, E.; BASTO, P. A.; ARAÚJO JÚNIOR, N. T.; MELO NETO, A. A. Assessing the pozzolanic activity of sugarcane bagasse ash using X-ray diffraction. *Construction and Building Materials*, v. 264, 11p. 2020. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2020.120684

UNIÃO DA INDÚSTRIA DA CANA DE AÇÚCAR (ÚNICA). Bioeletricidade em números – setembro de 2020. Boletim elaborado em setembro de 2020. São Paulo 8f. 2020. Acesso em março de 2021 – Disponível em: [<https://unica.com.br/publicacoes/>]

WANG, I-F.; LEE, C-H.; LU, C-K. Application of bagasse ash and pozzolanic material to cement mortar. 2016 International Conference on Power Engineering & Energy, Environment (PEEE 2016) ISBN: 978-1-60595-376-2. 13p. 2016.

XU, Q.; JI, T.; GAO, S-J.; YANG, Z.; WU, N. Characteristics and applications of sugar cane bagasse ash waste in cementitious materials. *Materials*, v. 12, n. 39, 2019;

DOI:10.3390/ma12010039

- YADAV, A.; SAIRAM, V.; MURUGANANDAM, L.; SRINIVASAN, K. An overview of the influences of mechanical and chemical processing on sugarcane bagasse ash characterisation as a supplementary cementitious material. *Journal of Cleaner Production*, v. 245, 16p. 2020. DOI: 10.1016/j.jclepro.2019.118854
- YANG, Y.; LUO, W. Effect of sugarcane bagasse ash and ceramic waste dust as partial replacements of Portland Cement on corrosion behaviour of HRB400 low carbon steel reinforcement in 3.5% NaCl. *International Journal of Electrochemical Science*, v. 15, p. 12410-12419, 2020. DOI: 10.20964/2020.12.29
- ZAREEI, S. A.; AMERI, F.; BAHRAMI, N. Microstructure, strength, and durability of eco-friendly concretes containing sugarcane bagasse ash. *Construction and Building Materials*. V. 184, p. 258-268. 2018. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2018.06.153
- ZHANG, P.; LIAO, W.; KUMAR, A.; ZHANG, Q.; MA, H. Characterization of sugarcane bagasse ash as potential supplementary cementitious material: Comparisson with coal combustion fly ash. *Journal of Cleaner Production*. V. 277. 2020. DOI: 10.1016/j.jclepro.2020.123834



# **ANEXOS**

## ANEXO A – Composição das CBCA

Tabela 1 - Composição química das cinzas de bagaço de cana geradas na queima industrial para produção de energia elétrica (bottom ashes), segundo a literatura consultada.

	Composição química - Porcentagem de óxidos												SiO <sub>2</sub> +Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> +Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	$\rho_{\text{CH}_3}$	
	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO	Na <sub>2</sub> O	K <sub>2</sub> O	SO <sub>3</sub>	MnO	MgO	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	TiO <sub>2</sub>	LOI			
[1]	78,34	8,55	3,61	2,15	0,12	3,46	-	0,13	1,65	1,07	-	0,42	90,5	2,53	
[2]*	72,82	6,74	3,57	1,19	0,65	1,31	1,44	-	1,19	-	-	7,24	83,13	1,95	
[3]	56,37	14,61	5,04	2,36	1,57	3,29	-	-	1,43	0,85	-	10,53	76,02	2,19	
[4]*	60,17	13,65	6,52	2,34	0,49	3,20	0,24	0,20	1,08	1,04	1,03	9,00	80,33	-	
[5]	76,16	8,38	2,17	2,32	0,19	3,97	0,24	-	1,47	1,49	0,42	2,46	86,71	2,53	
[6]	60,98	6,07	7,39	12,66	0,15	3,53	1,23	-	2,51	0,61	-	4,80	74,44	2,15	
[7]*	59,94	13,59	6,49	2,33	0,49	3,19	0,24	0,20	1,08	1,03	1,02	9,34	80,03	-	
[8]	65,00	4,80	0,90	3,90	-	2,00	0,90	-	-	-	-	10,50	70,70	2,24	
[9]	74,00	3,70	1,80	1,70	-	4,40	0,30	-	0,70	1,80	0,40	11,20	79,50	-	
[10]*	57,63	1,33	1,49	6,14	0,02	7,33	-	-	1,56	-	-	21,00	60,45	1,91	
[11]	66,61	9,46	10,08	1,43	0,22	3,19	0,10	-	0,92	1,04	2,44	4,27	86,15	-	
[12]	72,30	5,52	10,80	1,57	-	-	-	-	1,13	1,11	3,68	1,52	88,62	-	
[13]	62,44	6,74	5,77	6,16	3,15	6,87	0,72	-	2,97	-	-	2,58	74,95	2,22	
[14]	64,88	6,40	2,63	10,69	-	-	1,56	-	1,55	-	-	8,16	73,91	-	
[15]	55,04	5,14	4,06	11,03	0,24	1,22	2,16	-	0,91	-	-	19,60	64,24	2,27	
[16]	72,74	5,26	3,92	7,99	0,84	3,47	0,13	-	2,78	1,59	0,32	0,77	81,92	-	
[17]*	51,95	3,90	19,72	1,77	-	3,66	0,23	0,33	0,93	1,03	5,80	9,52	75,57	2,75	
[18]	69,94	3,34	1,25	2,27	1,49	5,83	0,42	0,06	6,68	6,12	0,09	2,35	74,53	-	
[19]	91,30	2,30	3,00	0,40	-	0,50	-	-	0,20	-	0,90	1,30	96,60	2,69	
[20]	55,70	2,86	3,51	15,34	0,37	6,10	-	-	4,08	-	-	8,92	62,07	2,34	
[21]	ST	80,20	2,60	5,60	1,80	0,20	4,00	0,10	0,20	1,60	1,40	1,40	0,80	88,40	2,57
	T	80,80	2,50	5,80	1,60	0,20	3,90	0,10	0,10	1,50	1,40	1,30	0,70	89,10	-
[22]	J	88,20	2,30	5,10	0,60	0,10	1,30	0,10	-	0,40	0,40	1,00	0,35	95,60	2,58
	I	96,20	0,20	1,70	0,10	-	0,30	0,10	-	0,10	0,10	1,04	98,10	2,23	
	B	62,70	4,50	8,80	0,90	0,10	1,80	0,20	-	0,60	0,70	3,10	16,28	76,00	2,63
	A	93,50	1,20	2,60	0,40	0,10	0,80	0,10	-	0,30	0,20	0,50	0,34	97,30	2,65
[23]	1	66,80	7,70	10,20	0,94	<0,1	1,03	0,20	-	0,49	-	-	11,77	84,70	2,47
	1m	69,50	5,87	5,93	0,84	<0,1	1,19	0,22	-	0,51	-	-	16,20	81,30	2,42
[24]		55,05	3,87	0,42	5,09	0,94	4,00	-	-	4,82	-	-	59,34	1,86	
[25]*		76,17	6,28	4,15	3,99	1,36	2,31	0,11	0,27	2,57	0,58	0,57	1,40	86,60	-
[26]		62,43	4,28	6,98	11,8	-	3,53	1,48	-	2,51	-	-	4,73	73,69	1,25
[27]		78,34	8,55	3,61	2,15	0,12	3,46	-	0,13	-	1,07	0,5	0,42	90,50	1,84
[28]		75,90	1,55	2,32	6,25	0,12	8,40	-	-	1,77	-	-	4,00	79,77	2,16
[29]		85,17	1,69	2,73	2,59	0,29	0,36	0,17	-	0,69	-	-	3,55	89,59	2,12
[30]		54,40	9,10	5,50	12,40	0,90	1,30	4,10	-	2,90	-	-	9,40	69,00	-
[31]		58,06	7,69	3,89	3,21	0,73	3,09	1,39	0,06	-	1,67	0,47	16,70	69,64	1,94
[32]		77,08	1,46	2,42	6,22	0,30	5,36	-	-	1,60	-	-	4,20	80,96	2,10
[33]		79,50	1,03	1,12	3,14	0,12	2,90	1,23	0,13	2,07	3,20	0,10	4,95	81,65	1,95
	1	39,00	13,65	11,40	3,19	-	1,95	0,21	-	1,55	1,16	0,90	24,10	64,05	-
[34]	2	59,10	4,19	2,01	2,42	0,16	3,73	0,81	-	1,65	1,25	0,78	23,60	65,30	-
	3*	96,40	0,74	2,05	0,25	-	0,49	0,02	-	0,20	0,15	0,45	0,41	99,19	-
	4	93,40	1,69	2,69	0,36	-	0,71	0,03	-	0,27	0,16	0,97	0,31	97,78	-
[35]		65,26	6,91	3,65	4,01	0,33	1,99	0,21	-	1,10	-	-	15,34	75,82	2,35
[36]		80,40	7,84	3,68	0,51	0,37	1,50	0,09	0,08	0,97	0,19	0,93	3,03	91,92	-
[37]*		52,49	9,38	7,84	8,27	0,88	7,89	-	-	7,53	-	-	5,40	69,72	2,18
[38]		61,59	5,92	7,36	5,00	-	6,22	0,42	0,10	1,17	0,98	1,46	9,78	74,87	-

	Composição química - Porcentagem de óxidos												SiO <sub>2</sub> +Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> +Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	$\rho$ g/cm <sup>3</sup>
	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO	Na <sub>2</sub> O	K <sub>2</sub> O	SO <sub>3</sub>	MnO	MgO	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	TiO <sub>2</sub>	LOI		
[39]	89,00	0,27	1,09	0,10	-	0,10	-	-	-	-	0,27	0,90	90,36	-
[40]	68,42	5,81	0,22	2,56	-	-	4,33	-	0,57	1,28	-	15,90	74,45	-
[41]*	60,17	13,65	6,52	2,34	0,49	3,20	0,24	0,20	1,08	1,04	1,03	9,00	80,33	-
[42]	78,45	2,71	2,09	4,07	0,61	3,93	1,86	-	2,42	-	-	4,67	83,25	-
[43]	59,50	2,40	3,34	14,75	1,42	-	0,92	-	2,11	-	-	8,90	65,24	-
[44]*	57,63	1,33	1,49	6,14	0,02	7,33	3,52	-	1,56	-	-	21,00	60,45	1,91
[45]	51,74	9,52	2,65	9,82	4,45	9,53	3,42	-	4,36	-	-	4,51	63,91	-
[46]	65,98	2,26	1,49	2,65	0,80	1,79	-	0,04	2,18	0,73	0,20	4,67	69,73	2,14
[47]	54,40	9,10	5,50	12,40	0,90	1,30	4,10	-	2,90	-	-	9,40	69,00	-
[48]	70,39	-	1,50	6,15	-	13,48	2,90	0,17	-	2,68	0,14	2,40	71,89	-
[49]	65,43	9,06	1,50	9,88	1,28	4,24	-	0,02	4,51	1,94	0,22	1,90	76,00	-
[50]	53,20	6,89	3,00	3,45	0,66	7,08	-	-	2,82	-	-	22,90	63,09	2,02
Mín	39,00	0,00	0,22	0,10	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	59,34	1,25
Média	68,82	5,39	4,33	4,28	0,50	3,35	0,67	0,04	1,66	0,71	0,56	7,66	78,53	2,22
Máx	96,40	14,61	19,72	15,34	4,45	13,48	4,33	0,33	7,53	6,12	5,80	24,10	99,19	2,75
Mediana	66,30	4,97	3,54	2,58	0,20	3,20	0,21	0,00	1,31	0,20	0,10	4,77	77,76	2,21
Desv. P.	12,86	3,77	3,40	3,95	0,78	2,72	1,07	0,08	1,55	1,04	1,03	7,16	10,89	0,32
Varição	19	70	78	92	158	81	160	190	93	147	184	93	14	14
Quartil 1	59,49	2,33	2,06	1,63	0,00	1,30	0,00	0,00	0,62	0,00	0,00	1,62	69,97	2,00
Quartil 2	66,30	4,97	3,54	2,58	0,20	3,20	0,21	0,00	1,31	0,20	0,10	4,77	77,76	2,21
Quartil 3	78,03	7,70	5,79	6,15	0,67	4,00	0,88	0,05	2,16	1,07	0,87	10,52	86,68	2,49

REFERÊNCIAS

[1] CORDEIRO et al, 2008, 2011, 2012; [2] ARIF et al. 2016; [3] MALDONADO-GARCÍA et al., 2018; [4] RÍOS-PARADA et al., 2017; [5] ZHANG et al., 2020; [6] OTUOZE et al., 2012; [7] ARENAS-PIEDRAHITA et al., 2016; [8] RUKZON, CHINDA, 2011; [9] AKKARAPONGTRAKUL et al., 2017; [10] DEEPIKA et al., 2017; [11] FRÍAS et al., 2011; [12] SOARES et al., 2016; [13] AKRAM et al., 2009; [14] CHUSILP et al., 2009; [15] RERKIPIBOON et al., 2015; [16] HERNÁNDEZ et al., 1998; [17] CASTRO, MARTINS, 2016; [18] GAR et al., 2017; [19] MORETTI et al., 2018; [20] JOSHAGHANI, MOENI, 2017; [21] ALMEIDA et al., 2015 7; [22] SALES, LIMA, 2010 5; [23] FERREIRA, 2015; [24] JAGADESH et al., 2018; [25] HUSSEIN et al., 2014; [26] MODANI et al., 2013; [27] REDDY et al., 2015; [28] MURUGESAN et al., 2020; [29] KAZMI et al., 2017; [30] TORRES et al., 2020; [31] YADAV et al., 2020; [32] KUMAR et al., 2020; [33] KATARE, MADURWAR, 2020; [34] FIGUEIREDO, PAVÍA, 2020; [35] SUA-IAM, MAKUL, 2013; [36] BRAZ et al., 2019; [37] PRAVEENKUMAR, SANKARASUBRAMANIAN, 2019 [38] SCHETTINO, HOLANDA, 2015; [39] MOLIN FILHO et al., 2019; [40] AZMATULLAH et al., 2019; [41] FRANCO-LUJÁN et al., 2019; [42] SINGH, 2018; [43] MARDURWAR et al., 2016; [44] BAHURUDEEN et al., 2016; [45] YANG, LUO, 2020; [46] DEBBARMA et al., 2020; [47] CHI, 2015; [48] BATOOL et al., 2020; [49] JAVED et al., 2020; [50] LE et al., 2018.

\* CORREÇÕES

As referências marcadas com \*, não desconsideraram a parcela de LOI quando calcularam a composição em óxidos, sendo que o somatório das frações somou mais de 101%. Foi aplicada a seguinte correção:

$$P_{real} = 0,01 \times P_{info} \times (100 - LOI)$$

Sendo: P<sub>real</sub> o valor informado na tabela; P<sub>info</sub> a porcentagem informada no trabalho consultado para o óxido considerado; LOI a porcentagem de LOI informada no trabalho consultado

[11] cinzas industriais indicadas no trabalho original por BBA; [15] cinzas trituradas 45µm; [22] cinzas de plantas industriais diferentes; [21] ST: cinzas sem tratamento, T: cinzas trituradas e peneiradas; [34] cinzas de plantas industriais diferentes

Tabela 2 - Composição química das cinzas de bagaço de cana geradas em queima controlada, segundo a literatura consultada.

	Tipo de queima	Composição química (%)											SiO <sub>2</sub> +Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> +Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	$\rho$ , g/cm <sup>3</sup>
		SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO	Na <sub>2</sub> O	K <sub>2</sub> O	SO <sub>3</sub>	MnO	MgO	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	LOI		
[1]	600°C 3h	73,50	8,50	2,90	4,50	-	3,50	2,40	0,20	-	1,00	3,00	84,90	2,54
[2]	600°C 3h	69,33	11,42	6,12	10,57	-	-	-	-	1,92	-	0,52	86,87	2,22
[3]	500°C	54,10	2,86	3,32	14,10	0,29	5,70	-	-	3,86	-	11,46	60,28	-
	600°C	54,80	3,12	3,75	13,80	0,29	5,60	-	-	3,98	-	10,34	61,67	-
	700°C	54,00	2,80	3,42	14,40	0,32	6,00	-	-	4,03	-	10,58	60,22	-
	800°C	55,70	2,86	3,51	15,34	0,37	6,10	-	-	4,08	-	8,92	62,07	2,22
	1000°C	53,40	2,91	3,46	14,50	0,37	6,00	-	-	4,05	-	12,10	59,77	-
[4]	s/ controle	78,60	4,50	4,90	1,30	0,20	-	0,70	-	-	-	4,40	88,00	-
[5]	650°C 1h	64,15	9,05	5,52	8,14	0,92	1,35	-	-	2,85	-	4,90	78,72	1,85
[6]	600°C 3h	80,90	7,52	5,95	0,95	<0,1	1,23	0,22	-	0,57	-	0,81	94,37	2,65
	1m	81,20	6,94	7,40	1,01	0,13	1,42	0,25	-	0,69	-	0,69	95,54	2,66
[7]	600°C 6h	81,79	6,33	1,92	3,00	-	3,22	1,31	0,14	-	1,91	-	90,04	-
[8]	700°C 1h	64,23	9,08	5,47	8,17	0,87	1,32	-	-	2,97	-	-	78,78	1,51
[9]*	750°C 1h	71,13	1,43	2,15	6,22	0,11	9,01	-	-	1,76	-	6,00	74,71	2,12
[10]	400°C por 4h	66,50	4,82	4,67	3,83	0,59	4,07	-	-	2,87	-	-	75,99	2,22
[11]*	450-650°C 1-3h	80,71	2,28	1,63	3,18	-	3,56	0,28	-	1,36	-	7,00	84,62	-
[12]	400°C 1h seguido por 700°C 1h	36,20	12,30	8,76	7,10	-	12,8	4,38	0,30	4,75	5,42	5,37	57,26	-
[13]	Não especificado	80,45	7,19	2,38	2,73	0,14	3,65	0,87	-	1,08	-	0,38	90,02	1,96
[14]	600°C – 3h	43,28	0,58	3,50	9,12	4,31	9,57	-	-	3,75	2,08	4,80	47,36	-
[15]	700°C – 1:30h	71,30	9,00	4,41	4,11	0,79	3,01	1,36	0,07	-	2,12	2,00	84,71	2,14
[16]	650°C – 2:00h	43,34	10,45	8,31	22,16	0,19	2,18	1,08	0,14	1,48	-	7,61	62,10	-
[17]	600°C – 4h	76,52	4,39	2,99	2,79	1,02	4,01	0,39	-	1,42	-	3,76	83,90	-
[18]	400°C-20min seguido por 800°C-1h	69,40	11,26	5,41	2,51	0,09	3,45	1,83	-	1,28	1,61	1,56	86,07	-
ESTATÍSTICAS	Mínimo	36,20	0,58	1,63	0,95	-	-	-	-	-	-	0,38	47,36	1,51
	Média	65,41	6,16	4,43	7,54	0,50	4,21	0,66	0,04	2,12	0,61	5,31	76,00	2,19
	Máximo	81,79	12,30	8,76	22,16	4,31	12,8	4,38	0,30	4,75	5,42	12,10	95,54	2,66
	Mediana	69,33	6,33	3,75	6,22	0,25	3,56	0,22	-	1,76	-	4,85	78,78	2,22
	Desv Padrão	13,69	3,52	1,96	5,79	0,91	3,14	1,06	0,08	1,58	1,29	3,85	13,99	0,35
	Varição	21	57	44	77	182	75	162	218	75	210	72	18	16
	Quartil 1	54,45	2,89	3,16	2,90	0,10	1,80	-	-	0,89	-	1,89	61,87	2,04
Quartil 2	69,33	6,33	3,75	6,22	0,25	3,56	0,22	-	1,76	-	4,85	78,78	2,22	
Quartil 3	77,56	9,03	5,50	12,19	0,54	5,85	0,98	-	3,81	0,50	7,94	86,47	2,38	
REFERÊNCIAS	[1] ANDREÃO et al., 2019; [2] WANG et al., 2016; [3] JOSHAGHANI, MOENI, 2017 <sup>1</sup> ; [4] PEREIRA et al., 2018; [5] GANESAN et al., 2007; [6] FERREIRA, 2015; [7] SHOLEH et al., 2020; [8] ZAREEI et al., 2018; [9] DEEPIKA et al., 2017; [10] JAGADESH et al., 2018; [11] RAJASEKAR et al., 2018; [12] RODIER et al., 2019; [13] ABBAS et al., 2019; [14] PRAVEENKUMAR, SANKARASUBRAMANIAN, 2020; [15] YADAV et al., 2020; [16] CASTALDELLI et al., 2016; [17] TORRES et al., 2020; [18] FRÍAS et al., 2011													
CORREÇÕES	As referências marcadas com *, não desconsideraram a parcela de LOI quando calcularam a composição em óxidos, sendo que o somatório das frações somou mais de 101%. Foi aplicada a seguinte correção: $P_{real} = 0,01 \times P_{info} \times (100 - LOI)$ Sendo: P <sub>real</sub> o valor informado na tabela; P <sub>info</sub> a porcentagem informada no trabalho consultado para o óxido considerado; LOI a porcentagem de LOI informada no trabalho consultado													
[3] tempo de combustão: 30min; [4] autocombustão por 24h, máxima temperatura atingida: 700°C														

Tabela 3 – Estimativa da densidade das cinzas a partir dos teores de óxidos – regressões lineares.

Parâmetros avaliados	CA	CL	R <sup>2</sup>	DM (g/cm <sup>3</sup> )
----------------------	----	----	----------------	-------------------------

		*	**	*	**	*	**	*	**
1	CA x [(%)Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> ] + CL	-0,0081	-0,0054	2,3098	2,2475	0,0058	0,0030	0,2	0,3
2	CA x [(%)LOI] + CL	-0,0357	-0,0061	2,3692	2,3535	0,0619	0,0582	0,3	0,3
3	CA x [(%)Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> ]	0,3158	0,338	-	-	0,6524	0,6886	1,2	1,1
4	CA x [(%) SiO <sub>2</sub> ]	0,0294	0,0313	-	-	0,9710	0,9680	0,4	0,3
5	CA x [(%) SiO <sub>2</sub> + (%)Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> + (%)Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> ]	0,0264	0,0277	-	-	0,9822	0,9779	0,3	0,3
6	CA x [(%) SiO <sub>2</sub> + (%)Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> + (%)Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> - LOI]	0,0272	0,0297	-	-	0,9794	0,9567	0,2	0,4
7	CA x [(%) SiO <sub>2</sub> + (%)Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> ]	0,028	0,0296	-	-	0,9808	0,9762	0,2	0,3
8	CA x [(%) SiO <sub>2</sub> x ρ <sub>1</sub> ] + [(%)Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> x ρ <sub>2</sub> ] + [(%)Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> x ρ <sub>3</sub> ]/100	0,9181	0,9616	-	-	0,9851	0,9796	0,2	0,3

$$\rho_1 = 2,65; \rho_2 = 3,95; \rho_3 = 5,24;$$

\* considerando apenas cinzas com LOI < 10% e somatório de óxidos de silício, ferro e alumínio maior que 65%

\*\* considerando todas as referências das Tabelas 1 e 2 do Anexo A que apresentaram valores para densidade das cinzas

DM: desvio médio  $DM = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N |Y_i - Y'_i|$  em que:  $Y_i$  valor obtido em ensaio,  $Y'_i$  valor gerado na correlação, N número de amostras

Usar o valor percentual, por exemplo o material é composto por 67% de SiO<sub>2</sub>; usar o número 67 na Equação onde aparece (%)SiO<sub>2</sub>

Tabela 4 – Teste estatístico ANOVA para as distribuições de óxidos entre queimas diferentes

Óxidos (%)		SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO	Na <sub>2</sub> O	K <sub>2</sub> O	SO <sub>3</sub>	MnO	MgO	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	LOI	SiO <sub>2</sub> +Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> +Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	P (g/cm <sup>3</sup> )
		Queima industrial	Média	68,82	5,39	4,33	4,28	0,5	3,35	0,67	0,04	1,66	0,71	7,66
	DP	12,86	3,77	3,4	3,95	0,78	2,72	1,07	0,08	1,55	1,04	7,16	10,89	0,32
Queima controlada	Média	65,41	6,16	4,43	7,54	0,5	4,21	0,66	0,04	2,12	0,61	5,31	76,00	2,19
	DP	13,69	3,52	1,96	5,79	0,91	3,14	1,06	0,08	1,58	1,29	3,85	13,99	0,35
Valor p	HE	0,312	0,389	0,874	0,019	0,983	0,257	0,953	0,820	8x10 <sup>-11</sup>	0,760	0,070	0,441	0,391
	HO	0,295	0,400	0,899	0,005	0,981	0,223	0,953	0,818	3x10 <sup>-6</sup>	0,735	0,167	0,387	0,644

DP – desvio padrão; HE – heteroscedástica; HO – homoscedástica

Hipótese nula: a composição de óxidos segue a mesma distribuição nos dois tipos de queima

Confiabilidade 95%, rejeita-se a hipótese nula se valor p < 0,05

Valor p = 0,295: significa que há 29,5% de chance de cometer um erro ao considerar que as distribuições são iguais.

## ANEXO B – Ganho de Resistência em Concreto Utilizando CBCA

Tabela 1 – Traços e características das cinzas e do concreto em pesquisas de substituição de cimento por CBCA.

		CORDEIRO et al., 2009	CORDEIRO et al., 2012	CHUSILP et al., 2009	CORDEIRO et al., 2018	GANESAN et al., 2007	BATOOL et al., 2020	GAR et al., 2017	REKPIBOON, 2015	RUKZON, CHINDAPRASIRT, 2011	JAGADESH et al., 2018	HUSSEIN, et al., 2014	BAHURUDEEN et al., 2015	
Correspondência na Figura 5		M1-0,35	M2-0,6	M3-0,5	M4-0,6	M5-0,34	M6-0,56	M7-0,5	M8-0,5	M9-0,45	M10-0,3	M11-0,6	M12-0,38	M13-0,45
SiO <sub>2</sub> +Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> +Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	%	90,5	90,53	73,91	90	79,07	73,66	74,6	64	71	75,99	87,83	76,52	
LOI	%	0,42	0,42	8,16	0,4	4,9	2,4	2,35	19,6	10,5	-	1,4	19	
Densidade	g/cm <sup>3</sup>	2,53	2,53	2,2	2,53	0,59			2,27	2,24	2,22		1,91	
Fração menor que 45micro	%	67,4	67,4	97,2	100	99	50	100	99,5	95	90	95	55	
dmáx	µm	45		67	40	5,4	150	10		100	30		600	
d90	µm	9		22	11		103			50			150	
d50	µm	1,6	2,7	10	2,7		47		5,68	17			30	
d10	µm	0,23		2,7	0,2		18			2,5			7	
Aglomerante		OPC - I	OPC - I	OPC - I	Classe G-sem adição CC -scba1	OPC - I	OPC - I		OPC - I	OPC - I	OPC - I	OPC - I	OPC - I	
					HS-scba1									
Traço		1:1,8:1,9	1:2:3	1:2:3	1:2:3	1:1,8:1,9	1:2:3	1:2:4	1:2:3	1:1,7:2,1	1:1,3:1,7	1:3,2:2	1:1,9:1,5	-
Substituições (%)		10, 15,20	20	10,20,30	10, 15, 20	10, 15, 20	5, 10, 15, 20, 25	5, 10, 15, 20, 25, 30	5, 10, 15, 20, 25	10, 20, 30,40, 50	10, 20, 30	5, 10, 15, 20, 25, 30	5, 10, 15, 20, 25, 30	10, 15, 20, 25
a/c		0,35	0,6	0,5	0,6	0,34	0,53	0,5	0,5	0,45	0,3	0,55	0,38	0,45
Resistência de referência (28 dias)	MPa	60,86	24	36,9	24	61		23,7		41,1	65	18,2	62	58,5

Tabela 2 – Traços e características das cinzas e da argamassa produzida em pesquisas de substituição de cimento por CBCA produzida em queima industrial

Correspondência na Figura 5		CORDEIRO et al., 2012			MOEINI 2018	BERENGUER et al., 2016	MALDONADO-GARCÍA et al., 2018	AKKARAPONGTRAKUL et al., 2017	ARENAS-PIEDRAHITA et al., 2016	JOSHAGHANI MOEINI 2017	DE PAULA et al., 2009	KAZMI et al., 2018	CHI et al., 2020
		M1-0,48	M2-0,48	M3-0,48	M4-0,57	M5-0,48	M6-0,63	M7-05	M8-0,6	M9-0,485	M10-0,48	M12-0,47	M13-0,55
SiO <sub>2</sub> +Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> +Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	%		90,5		64	89,2	76,02	80	88	62,1	90	89,59	69
LOI	%		0,4		8,92	3,3	10,53	11	9	8,9	5	3,55	9
Densidade	g/cm <sup>3</sup>		2,5		2,34	-	2,19		2	2,2	-	-	-
Fração menor que 45micro	%		100		77	-	55		50	77	-	100	100
dmáx	µm		70		110	75	210		300	105	14		
d90	µm	29	8	15	60	-	90		101	50	-		
d50	µm	13,9	2	3,8	25	-	40		45	11,5	-		
d10	µm	2,5	0,8	1,1	5	-	12		12	1,6	<1		
Aglomerante			CP II F 32		OPC - I	OPC - I				OPC - I	CPV ARI PLUS		
Traço			1:3		1:2,63	1:3	1:3	1:3		1:2,75	1:3	1:2,25	1:3
Substituições (%)			25		10, 15, 20, 25	5, 10, 15, 20, 25, 30	10, 20	20	10, 20	10, 15, 20, 25, 30	10, 20, 30	10, 20, 30, 40	10, 20, 30
a/c			0,48		0,57		0,63	0,5	0,6	0,48	0,48	0,47	0,55
Resistência de referência (28 dias)	MPa											45	37

Tabela 3 – Traços e características das cinzas e da argamassa produzida em pesquisas de substituição de cimento por CBCA produzida em queima controlada

		PEREIRA et al., 2018					WANG et al., 2016			GANESAN et al., 2007			TORRES et al., 2020
Correspondência na Figura 5		M14-0,5	M15-0,45	M15-0,5	M15-0,55	M15-0,6	M15-0,65	M16-0,53	M17-0,48	M18-0,48	M19-0,48		
SiO <sub>2</sub> +Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> +Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	%	88			86,87			79,07		84			
		R											
LOI	%	4,4			0,52			-		4			
Densidade	g/cm <sup>3</sup>	-			2,22			0,59		-			
Fração menor que 45micro	%	-			90			99		90			
Dmáx	µm	-			75			5,4		-			
d90	µm	82			45			-		-			
d50	µm	25			8			-		-			
d10	µm				1,5			-		-			
Aglomerante		CPV ARI			OPC – I					CP II F 32			
Traço		1:2,5			-			1:3		1:3			
Substituições (%)		10, 15, 20, 30			5, 10, 15, 20, 25, 30			5, 10, 15, 20, 25, 30		25			
a/c		0,5	0,45	0,50	0,55	0,60	0,65	0,53		0,48			
Resistência de referência (28 dias)	MPa		-	-	-	-	-			46			
Temperatura de queima		<700°C			600°C			650°C		600°C			
Tempo de queima		24h			3h			1h		4h			



## ANEXO C – Custo do Transporte de Cinzas Brutas

Tabela 1 - Valores de frete mínimo estabelecidos pela Resolução Nº 5.923, de 18 de janeiro de 2021

Tipo de carga	Coeficiente de custo	Unidade	Nº de eixos carregados do veículo combinado			
			4	5	7	9
Granel sólido	Deslocamento (CCD)	R\$/km	2,9163	3,2751	4,1077	4,6802
	Carga e descarga (C <sub>c</sub> )	R\$	263,30	277,11	357,60	387,88

Metodologia de cálculo estabelecida na pela resolução Nº 5.820, de 30 de maio de 2018 da ANTT. Não são considerados no cálculo do frete valores referentes à cobrança de pedágios, lucro do transportador, taxas de administração, custo de embarques e desembarques especiais, tributos como Imposto de Renda, ICMS, COFINS, etc.

Tabela 2 – Valores de referência para capacidade dos veículos de transporte de carga

Nº de eixos	4	5	7	9
Capacidade em toneladas Ct	33	41,5	57	74

Custo das cinzas brutas considerando apenas o transporte segundo o frete mínimo em reais/kg (CT):

$CT = [C_c + (n * CCD)] / (Ct * 1000)$ ; sendo n a quilometragem de transporte das cinzas (ida e volta)

Tabela 3 – Dosagem do concreto e preço dos materiais

	Preço dos materiais <sup>1</sup>		Preço (R\$/kg)		
Cimento <sup>2</sup>	(R\$/kg)	0,54			0,54
Areia média <sup>3</sup>	(R\$/m <sup>3</sup> )	66,67	*1,29 t/m <sup>3</sup>		0,051682
Brita 1 <sup>3</sup>	(R\$/m <sup>3</sup> )	77,39	*1,47 t/m <sup>3</sup>		0,052646
Dosagem (kg/m <sup>3</sup> )					
	Cimento	Areia média	Brita 1	Cinzas	Água
Referência	370	740	1110	-	185
Substituição 5%	351,5	740	1110	18,5	185
Substituição 10%	333	740	1110	37	185
Substituição 15%	314,5	740	1110	55,5	185
Substituição 20%	296	740	1110	74	185
Dosagem (Preço do concreto em reais)					
	Cimento	Areia média	Brita 1	Cinzas	Total
Referência	199,8	38,24	58,44	-	296,48
Substituição 5%	189,81	38,24	58,44	18,5*CT	286,49+(18,5*CT)
Substituição 10%	179,82	38,24	58,44	37*CT	276,50+(37*CT)
Substituição 15%	169,83	38,24	58,44	55,5*CT	266,51+(55,5*CT)
Substituição 20%	159,84	38,24	58,44	74*CT	256,52+(74*CT)

<sup>1</sup> valores obtidos de acordo com a tabela do SINAPI (2021) preços médios para o estado de Minas Gerais em fevereiro de 2021.

\* valores obtidos na caracterização dos materiais utilizados neste trabalho

<sup>2</sup> valor desconsiderado o frete.

<sup>3</sup> valor do material comprado na jazida desconsiderando frete.

## ANEXO D – Ensaios de Absorção de Água

Tabela 1 – Resultados dos ensaios de absorção de água da Fase 2 – taxa de absorção (método – NBR 9778:2009)

Traço	Nº de amostras	Absorção de água (%)						Conclusão
		Imersão	DP.	p	Fervura	DP.	p	
Referência	6	4,96	0,37	-	5,05	0,36	-	
Traço 1	7	5,76	0,37	0,001	5,92	0,33	5x10 <sup>-4</sup>	Aumento significativo
Traço 2	7	6,34	0,32	2x10 <sup>-5</sup>	6,45	0,28	1x10 <sup>-5</sup>	Aumento significativo
Traço 3	6	5,70	0,39	0,006	5,81	0,34	0,003	Aumento significativo

Tabela 2 – Resultados dos ensaios de absorção de água da Fase 2 – índice de vazios (método – NBR 9778:2009)

Traço	Nº de amostras	Índice de Vazios (%)						Conclusão
		Imersão	DP.	p	Fervura	DP.	p	
Referência	6	11,43	0,78	-	11,68	0,72	-	
Traço 1	7	12,95	0,79	0,003	13,29	0,74	0,001	Aumento significativo
Traço 2	7	14,02	0,58	5x10 <sup>-5</sup>	14,30	0,50	2x10 <sup>-5</sup>	Aumento significativo
Traço 3	6	12,74	0,85	0,010	12,99	0,73	0,008	Aumento significativo

Tabela 3 – Resultados dos ensaios de absorção de água da Fase 2 – massa específica (método – NBR 9778:2009)

Traço	Nº de amostras	Massa específica g/cm <sup>3</sup>									Conclusão
		Seca		Saturada		Pós-fervura		Real		p	
		valor	DP	Valor	DP	valor	DP	Valor	DP		
Ref.	6	2,31	0,02	2,42	0,01	2,43	0,04	2,60	0,02	-	
1	7	2,25	0,02	2,38	0,02	2,38	0,02	2,58	0,03	0,0518	Redução insignificante
2	7	2,21	0,02	2,35	0,02	2,36	0,02	2,58	0,01	0,0056	Redução significativa
3	6	2,24	0,01	2,36	0,01	2,36	0,01	2,56	0,02	0,0087	Redução significativa

DP: Desvio padrão amostral

p: valor-p (ANOVA)

ANOVA: one way variation analysis – no caso: ho – não houve aumento; h1: houve aumento (ou redução) – confiança 95%.

Tabela 4 – Resultados dos ensaios de absorção de água da Fase 3 – taxa de absorção (método – NBR 9778:2009)

Traço	Nº de amostras	Absorção de água (%)						Conclusão
		Imersão	DP.	Valor		p		
				p	Fervura		DP.	
Referência	6	7,13	0,52	-	7,27	0,53	-	
5%	5	7,74	0,37	0,033	7,92	0,36	-	Aumento significativo
10%	6	8,30	0,31	$7 \times 10^{-4}$	8,44	0,32	-	Aumento significativo
15%	6	9,07	0,35	$5 \times 10^{-5}$	9,23	0,34	-	Aumento significativo

Tabela 5 – Resultados dos ensaios de absorção de água da Fase 3 – índice de vazios (método – NBR 9778:2009)

Traço	Nº de amostras	Índice de Vazios (%)						Conclusão
		Imersão	DP.	Valor		p		
				p	Fervura		DP	
Referência	6	15,28	1,32	-	15,59	1,22	-	
5%	7	16,91	0,62	0,01599	17,28	0,70	-	Aumento significativo
10%	5	17,70	0,50	0,00245	18,02	0,52	-	Aumento significativo
15%	6	19,17	0,51	0,00017	19,50	0,61	-	Aumento significativo

Tabela 6 – Resultados dos ensaios de absorção de água da Fase3 – massa específica (método – NBR 9778:2009)

Traço	Nº de amostras	Massa específica g/cm <sup>3</sup>									Conclusão
		Seca		Saturada		Pós-fervura		Real		p	
		valor	DP	Valor	DP	valor	DP	Valor	DP		
Ref.	5	2,23	0,03	2,39	0,02	2,40	0,02	2,64	0,01	-	
5%	7	2,17	0,04	2,34	0,02	2,35	0,02	2,64	0,01	0,2669	Redução insignificante
10%	6	2,15	0,02	2,33	0,02	2,33	0,02	2,61	0,01	$9 \times 10^{-4}$	Redução significativa
15%	7	2,11	0,05	2,31	0,03	2,31	0,03	2,62	0,01	0,0019	Redução significativa

DP: Desvio padrão amostral

p: valor-p (ANOVA)

ANOVA: one way variation analysis – no caso: ho – não houve aumento; h1: houve aumento (ou redução) – confiança 95%.