

O presente estudo tem por objetivo investigar o efeito da substituição parcial de cimento Portland por cinza volante em concretos estruturais. A pesquisa procurou enfatizar a caracterização das misturas de concretos, por meio das propriedades físicas, mecânicas, ambientais, de durabilidade, assim como o custo do material e aplicabilidade. Foi utilizado um planejamento fatorial fracionado para o desenvolvimento do trabalho. Amostras das misturas produzidas foram caracterizadas no estado fresco (índice de consistência e calorimetria) e no estado endurecido (resistência à compressão após 28 e 60 dias de cura, absorção de água, microestrutura, durabilidade e ciclo de vida dos materiais do concreto). Os resultados revelaram que a utilização da cinza volante trouxe vários benefícios nas propriedades dos concretos.

Orientador: Prof. Dr. Sivaldo Leite Correia

Joinville, 2018

ANO
2018

FRANKY BRUNO WITZKE | PROPRIEDADES DE CONCRETOS ESTRUTURAIS
CONTENDO CINZA VOLANTE EM SUBSTITUIÇÃO PARCIAL AO CIMENTO PORTLAND



UNIVERSIDADE DO ESTADO DE SANTA CATARINA – UDESC
CENTRO DE CIÊNCIAS TECNOLÓGICAS – CCT
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO

**PROPRIEDADES DE CONCRETOS
ESTRUTURAIS CONTENDO CINZA
VOLANTE EM SUBSTITUIÇÃO
PARCIAL AO CIMENTO PORTLAND**

FRANKY BRUNO WITZKE

JOINVILLE, 2018

Witzke, Franky Bruno
PROPRIEDADES DE CONCRETOS ESTRUTURAIS CONTENDO
CINZA VOLANTE EM SUBSTITUIÇÃO PARCIAL AO CIMENTO
PORTLAND / Franky Bruno Witzke. - Joinville , 2018.
106 p.

Orientador: Sivaldo Leite Correia
Dissertação (Mestrado) - Universidade do Estado de
Santa Catarina, Centro de Ciências Tecnológicas,
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil,
Joinville, 2018.

1. Concreto. 2. Cinza volante. 3. Propriedades
físicas e mecânicas. 4. Durabilidade. I. Leite
Correia, Sivaldo. II. Universidade do Estado de
Santa Catarina. Programa de Pós-Graduação. III.
Título.

UNIVERSIDADE DO ESTADO DE SANTA CATARINA – UDESC
CENTRO DE CIÊNCIAS TECNOLÓGICAS – CCT
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL

FRANKY BRUNO WITZKE

**PROPRIEDADES DE CONCRETOS ESTRUTURAIS CONTENDO CINZA
VOLANTE EM SUBSTITUIÇÃO PARCIAL AO CIMENTO PORTLAND**

JOINVILLE
2018

FRANKY BRUNO WITZKE

**PROPRIEDADES DE CONCRETOS ESTRUTURAIS CONTENDO CINZA
VOLANTE EM SUBSTITUIÇÃO PARCIAL AO CIMENTO PORTLAND**

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, da Universidade do Estado de Santa Catarina – UDESC como requisito parcial à obtenção do grau de Mestre em Engenharia Civil.

Orientador: Prof. Dr. Sivaldo Leite Correia.

JOINVILLE

2018

**Propriedades de Concretos Estruturais Contendo Cinza Volante em
Substituição Parcial ao Cimento Portland**

por

Franky Bruno Witzke

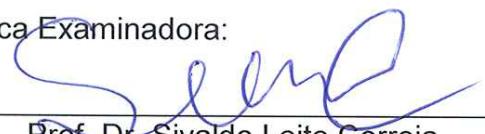
Esta dissertação foi julgada adequada para obtenção do título de

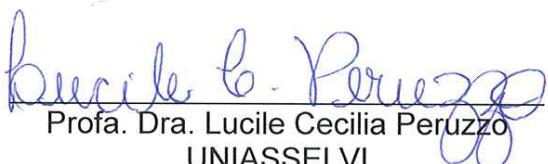
MESTRE EM ENGENHARIA CIVIL

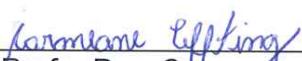
Área de concentração em “Engenharia Urbana e da Construção Civil”
e aprovada em sua forma final pelo

CURSO DE MESTRADO ACADÊMICO EM ENGENHARIA CIVIL
DO CENTRO DE CIÊNCIAS TECNOLÓGICAS DA
UNIVERSIDADE DO ESTADO DE SANTA CATARINA.

Banca Examinadora:


Prof. Dr. Sivaldo Leite Correia
CCT/UDESC (Orientador/Presidente)


Profa. Dra. Lucile Cecilia Peruzzo
UNIASSELVI


Profa. Dra. Carmeane Effting
CCT/UDESC

Joinville, SC, 22 de março de 2018.

Ao meu pai, Cláudio Marcelo Witzke,
que certamente, do plano espiritual,
está muito orgulhoso pela conclusão
do meu mestrado em engenharia civil.

AGRADECIMENTOS

Gostaria de expressar meus mais sinceros agradecimentos àqueles que contribuíram para a conclusão deste trabalho:

À Deus, por permitir, até hoje, que todos os meus sonhos se tornassem realidade. Por ter me renovado todas as vezes que o cansaço e o desânimo tenham chegado e que, através dos Seus ensinamentos, me torna uma pessoa melhor dia após dia. Por ter me mostrado o caminho certo a seguir todas as vezes em que eu precisei. Obrigado por tudo, meu Deus!

Aos meus pais, Dione e Cláudio, pelo apoio incondicional, por serem meus maiores incentivadores e encorajadores e não me deixaram desistir frente aos obstáculos que a vida de adulto impõe. Pela ajuda, quando precisei, na confecção de concretos, tradução de artigos, pela companhia nas viagens até Joinville em todas as vezes que me senti cansado e solitário demais para ir sozinho. Obrigado por serem o motivo de tudo aquilo que me tornei hoje.

À Márcia Cristina Ferreira, pela amizade, carinho e grande apreço que tem por mim. Por se fazer presente em todos os momentos.

Às minhas omãs, Lúcia e Tule, por todo o amor, carinho e afeto dado durante os meus anos de vida. Obrigado por tudo!

Ao meu professor orientador, prof. Dr. Sivaldo, pela orientação, dedicação e serenidade com que pautou a convivência durante esses dois anos de estudos. O meu respeito e enorme admiração por sua conduta, nos diversos momentos até a conclusão desta grande etapa da minha vida. Obrigado pelo crescimento pessoal, profissional e acadêmico que a convivência contigo me proporcionou.

Aos meus colegas de UDESC, Tânica, Thiago, Talita, Eduardo, Samoel, Ivana, Vitor e especialmente Natássia e Eloise, por me permitirem compartilhar angústias, medos e alegrias dessa vida de mestrando. Por serem companheiros na elaboração de trabalhos, artigos e por serem mais que colegas, por serem amigos. Meu maior presente deste mestrado foi ter encontrado vocês. Tenho a certeza de que os levarei para toda a minha vida.

Ao Dr. Adilson Schackow, pelo auxílio e paciência incansáveis com a minha pessoa durante esses dois anos de mestrado, no Laboratório de Construção Civil do CCT/UDESC. A certeza de que devo muito a você na conclusão do mestrado.

À professora Dra. Carmeane Effting, por ter sido meu primeiro contato no PPGEC, pelos ensinamentos passados durante a disciplina de Seminários, e pela companhia nos cafés da tarde deliciosos após as aulas. Pelo carinho que tem por mim. Meu muito obrigado!

À professora Dra. Lucile Cecília Peruzzo, por aceitar compor a banca de avaliação deste trabalho.

À professora Dra. Rafaela Vieira, pela sabedoria passada durante as suas aulas de Planejamento Urbano e Ambiental no PPGEA da Universidade Regional de Blumenau (FURB), pela parceria, dedicação e por ter me engajado a ingressar no mestrado.

À prof. Dra. Cassandra Helena Faes, pela amizade, incentivo e sabedoria passados a mim durante as suas aulas e conversas.

Aos meus colegas de trabalho da prefeitura, Talita, Letícia, Anderson, Luiz, Aldo e Lúcia. Por fazerem mais leves nosso dia-a-dia de trabalho. Pelas brincadeiras, risadas, conselhos e ensinamentos.

Às minhas colegas de trabalho de loja, Iris e Mira, pela amizade e alegria de todos os dias desde meus seis anos de idade, por me considerarem como família.

Aos meus amigos e amigas, que trago junto de mim para sempre Thais, Tárcia, Francine, Caio, Iago, Júnior, Camila, Juliana, Luiz Henrique, André, Sandra, Leia, Graciela, Tuany e todos aqueles que esqueci de mencionar aqui. Agradeço pela companhia durante todos esses anos de amizade, pela parceria em momentos alegres e, também, em momentos difíceis.

A empresa ENGIE Energia e ao seu colaborador Wherinton Cavalcante, por terem doado a cinza volante utilizada nesta pesquisa.

Ao engenheiro civil, Dr. Ricardo Girardi, e demais membros da equipe do CIENTEC, pelo auxílio e execução do ensaio de abrasão superficial.

Agradeço a todos aqueles que, por motivo de força maior, não estejam citados nesta seção e, que, por ventura tenham contribuído para esta pesquisa.

“Se alguém já lhe deu a mão, e não pediu mais nada em troca. Pense bem, pois é um dia especial. Eu sei, não é sempre que a gente encontra alguém que faça bem, que nos leve deste temporal.”

Cidadão Quem

RESUMO

O presente estudo tem por objetivo investigar o efeito da substituição parcial de cimento Portland por cinza volante em concretos estruturais. A pesquisa procurou enfatizar a caracterização das misturas de concretos, por meio das propriedades físicas, mecânicas, ambientais, durabilidade, assim como dos aspectos relacionados com o custo do material e aplicabilidade. Foi utilizado um planejamento fatorial fracionado para o desenvolvimento do trabalho, contemplando nove misturas dos fatores água/ligante (W/C: 0,28; 0,33 e 0,40), agregado/ligante (A/C: 2,70; 3,10 e 3,70) e o teor de substituição de cimento Portland por cinza volante (TC:10, 20 e 30%). As matérias primas e a cinza volante utilizadas nas misturas de concretos foram caracterizadas e as misturas foram preparadas em uma betoneira de acordo com as normas de produção de concreto. Amostras das misturas produzidas foram caracterizadas no estado fresco (índice de consistência e calorimetria) e no estado endurecido (resistência à compressão após 28 e 60 dias de cura, absorção de água, microestrutura, durabilidade e ciclo de vida dos materiais do concreto). Os resultados mostraram que W/C contribui para o aumento do índice de consistência, alterando a trabalhabilidade. Quanto maior for o TC, menor a geração de calor nas primeiras 24 horas de cura. A RC28 foi influenciada apenas por W/C, porém RC60 foi afetada por W/C e TC. A absorção de água diminuiu com menor W/C e maior TC. Os resultados obtidos permitiram fazer uma estimativa do custo dos materiais, aliados às características de aplicabilidade, do ponto de vista de propriedades ótimas e custo mínimo. Uma abordagem matemática por meio de otimização numérica gráfica mostrou que é possível obter concretos estruturais com um custo inferior a R\$ 280,00/m³, RC28 superior a 30 MPa e trabalhabilidade adequada para aplicação na construção civil (IC entre 60 e 120 mm). A avaliação do ciclo de vida identificou que os concretos com maiores teores de cimento Portland apresentaram maior carga ambiental nas categorias de impacto estudadas. Concretos com cinza volante tiveram menor resistência à abrasão superficial. O ensaio de ataque de sulfato evidenciou o primeiro estágio da penetração dos agentes expansivos nas amostras, mostrando a menor absorção de água após a exposição à substância. Dessa forma, o uso de cinza volante em concretos pode ser uma grande alternativa para a substituição parcial do cimento Portland, do ponto de vista das propriedades, custo e carga ambiental.

Palavras-chave: Concreto. Cinza volante. Propriedades físicas e mecânicas. Durabilidade.

ABSTRACT

This research aims to investigate the effect of a fly ash type as a partial replacement of Portland cement in structural concretes. Thus, the study searches for to characterise samples of concretes mixtures by measuring their physical, mechanical, environmental and durability properties, as well as the aspects of the applicability and cost. A fractional factorial design was created by varying three factors: the water to binder ratio (W/C: 0.28; 0.33 e 0.40), aggregate to binder ratio (A/C: 2.70; 3.10 e 3.70) and fly ash replacement content (FA) of 10, 20 e 30 wt. %). The raw materials and the fly ash were characterised and the mixtures were prepared in a mixer accordance with Brazilian standards. Fresh properties were analysed (the consistency index (IC) and calorimetry), hardened properties (28-and 60-day compressive strength, water absorption, microstructural characterisation, durability and life cycle assessment). The results showed that the factor W/C contributes to increase the consistence index, thus affecting the workability. The higher the FA content, the lowest the top hydration temperature during the 24 hours of cure period, which might probably be related to the heat of hydration of the fresh concrete. 28-day compressive strength was influenced only by W/C ratio. However, 60-day compressive strength was affected by FA content and W/C ratio. Water absorption decreases with reduced W/C ratio and higher FA contents. The results provided parameters to produce concrete mixture with an estimated material costs, applicability standard (optimum properties and lower costs). A mathematical approach through a numeric optimisation showed that is possible to obtain structural concretes with lower costs and optimised physical and mechanical properties, e.g., US\$ 84.85/m³, 28-day compressive strength higher than 30 MPa and IC values enough to target the required workability. The life cycle assessment showed that high levels of Portland cement concrete have a bigger environmental charge at selected categories. However, partial replacement of Portland cement by fly ash into concrete mixtures decreases the environmental charge. Fly ash concretes presented lower abrasion surface resistance when compared to standard concrete. Thus, the utilization of fly ash as a partial replacement of Portland cement in concrete is an excellent option from a point of view of properties, cost and environmental charge.

Keywords: Concrete. Fly ash. Mechanic and physic properties. Durability.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Localização das usinas termelétricas no Brasil.....	24
Figura 2 - Fases de uma avaliação de ciclo de vida.....	27
Figura 3 - Micrografia da cinza volante.....	40
Figura 4 - Amostra da cinza volante utilizada na pesquisa.....	48
Figura 5 - Fluxograma resumido do procedimento experimental.....	49
Figura 6 - Corpos de prova em cura úmida.....	53
Figura 7 - Fluxograma resumido da caracterização dos concretos.....	53
Figura 8 - Distribuição granulométrica das partículas de cinza volante.....	60
Figura 9 - Composição granulométrica do agregado miúdo.....	62
Figura 10 - Composição granulométrica do agregado graúdo.....	62
Figura 11 - Superfície de resposta para o IC das misturas de concreto, como uma função de TC e W/C, mantendo constante A/C em 3,10.....	64
Figura 12 - Gráfico de contorno (áreas) para o IC das misturas de concretos, como uma função de TC e W/C, mantendo constante A/C a 3,10.....	65
Figura 13 - Gráfico de contorno (linhas) para o IC das misturas de concretos, como uma função de TC e W/C, mantendo constante A/C a 3,10.....	65
Figura 14 - Efeito da temperatura da massa úmida das misturas de concreto padrão, M1, M2 e M3, com uma função do tempo de duração do ensaio, em amostras com W/C igual a 0,28.....	67
Figura 15 - Efeito da temperatura da massa úmida das misturas de concreto padrão, M4, M5 e M6, com uma função do tempo de duração do ensaio, em amostras com W/C igual a 0,33.....	68
Figura 16 - Efeito da temperatura da massa úmida das misturas de concreto padrão, M7, M8 e M9, com uma função do tempo de duração do ensaio, em amostras com W/C igual a 0,40.....	68
Figura 17 - Gráfico de contorno de linhas para RC28 das misturas de concreto, como uma função de W/C e TC, mantendo-se constante A/C em 3,10.....	71
Figura 18 - Gráfico de contorno de linhas para RC60 das misturas de concreto, como uma função de W/C e TC, mantendo-se constante A/C em 3,10.....	72
Figura 19 - Gráfico de contorno de linhas para AA das misturas de concreto, como uma função de W/C e TC, mantendo-se constante A/C em 3,10.....	74

Figura 20 - Gráfico de contorno de linhas para custo das misturas de concreto, como uma função de W/C e TC, mantendo-se constante A/C em 3,10.....	76
Figura 21 - Gráfico de contorno de linhas para IC, RC28 e AA das misturas de concreto, como uma função de W/C e TC, mantendo-se constante A/C em 3,10.....	78
Figura 22 - Imagem MEV SE (350x) da superfície polida da amostra padrão de concreto, após 60 dias de idade.....	81
Figura 23 - Imagem MEV SE (350x) da superfície da amostra de concreto polida de número 4 após 60 dias de idade.....	81
Figura 24 - Absorção de água de M4 e Mpadrão antes e depois do ataque de sulfato.....	83
Figura 25 - Gráfico dos resultados do ensaio de abrasão superficial.....	84
Figura 26 - Gráfico da carga ambiental para a categoria de mudanças climáticas dos componentes das misturas de concreto.....	87
Figura 27 - Gráfico da carga ambiental para a categoria de depleção de recursos fósseis dos componentes das misturas de concreto.....	87

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 - Composição do cimento Portland.....	30
Quadro 2 - Tipos de cimentos disponíveis no mercado nacional.....	31
Quadro 3 - Tipos de materiais pozolânicos.....	33
Quadro 4 - Influência da cinza volante no processo de hidratação do cimento.....	44

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Exigências químicas dos materiais pozolânicos.....	34
Tabela 2 - Exigências físicas dos materiais pozolânicos.....	34
Tabela 3 - Proporções do projeto fatorial.....	51
Tabela 4 - Misturas do projeto fatorial.....	51
Tabela 5 - Quantidade de material para cada tipo de mistura do projeto fatorial.....	52
Tabela 6 - Classificação de concreto para fins estruturais (RC28) - NBR 8953 (2015).....	57
Tabela 7 - Classificação de concreto para fins estruturais (IC) - NBR 8953 (2015).....	57
Tabela 8 - Teores dos componentes do CP II-Z de acordo com a NBR 11578 (1997).....	59
Tabela 9 - Composição química da cinza volante.....	60
Tabela 10 - Atividade pozolânica.....	61
Tabela 11 – Resultados do índice de consistência.....	63
Tabela 12 - Resultados da resistência à compressão.....	70
Tabela 13 – Resultados do ensaio de absorção de água.....	73
Tabela 14 - Custo dos concretos.....	75
Tabela 15 - Classificação de concreto para fins estruturais (IC) - NBR 8953 (2015).....	79
Tabela 16 - Classificação de concreto para fins estruturais (RC28) - NBR 8953 (2015).....	79
Tabela 17 - Classificação das mistura de concreto selecionadas.....	79
Tabela 18 - Resultados de RC28 das amostras selecionadas.....	80
Tabela 19 - Índice de absorção de água das amostras de concreto antes e depois da exposição ao ataque de sulfato e sua variação (em %).....	82
Tabela 20 - Resultados do ensaio de abrasão superficial.....	84
Tabela 21 - % dos componentes de concreto na geração de carga ambiental.....	85
Tabela 22 - Resultados ACV.....	86

LISTA DE ABREVIATURAS, SIGLAS E SÍMBOLOS

ASTM	<i>American society for testing and materials</i>
ABNT	Associação brasileira de normas técnicas
NBR	Norma técnica brasileira
NM	Norma Mercosul
ISO	Organização internacional para padronização
ACV	Análise do ciclo de vida
ANEEL	Agência nacional de energia elétrica
SNIC	Sindicato nacional da indústria do cimento
CIENTEC	Centro de ciência e tecnologia do Rio Grande do Sul
SINAPI	Sistema nacional de pesquisa de custos e índices da construção civil
CTC-mat	Centro de Tecnologia em Materiais
SENAI	Serviço nacional de aprendizagem industrial
CH	Hidróxido de cálcio ou portlandita
C-S-H	Silicato de cálcio hidratado / Gel hidratado – CSH
MPa	Megapascal
ARI	Alta resistência inicial
RS	Resistente a sulfatos
CP	Cimento Portland
RC28	Resistência à compressão aos 28 dias de idade
RC60	Resistência à compressão aos 60 dias de idade
AA	Absorção de água
IC	Índice de consistência da argamassa
ASR	<i>Abrasion Surface Resistance</i> (Resistência à abrasão superficial)
W/C	<i>Water to binder ratio</i> (Relação água/ligante)
A/C	<i>Aggregate to binder ratio</i> (Relação agregado/ligante)
TC	Teor de substituição de cimento Portland por cinza volante.
Fcj	Resistência mecânica de dosagem
°C	Grau Celcius
mm	Milímetro
cm	Centímetro
m.	Metro
m³	Metros cúbicos
g/cm³	Grama por centímetros cúbicos
kg/dm³	Quilos por decímetros cúbicos
MJ/t	Mega joules por tonelada
KWh/t	Quilowatts hora por tonelada
µm	micrometro
tri.	trimestre
Co	Cobalto
Cr	Cromio
Mn	Manganês
Zn	Zinco
Cu	Cobre
Ni	Niquel
K ₂ O	Dióxido de potássio
TiO ₂	Dióxido titânio
P ₂ O ₅	Pentóxido de difósforo

SO_3	Trióxido de enxofre
CaO	Óxido de cálcio
SiO_2	Sílica
Al_2O_3	Alumina
Fe_2O_3	Óxido férrico
CO_2	Dióxido de carbono
pH	Neutralidade ou alcalinidade de uma solução aquosa
C_2S	Silicato dicálcico
H_2O	Água
S	Enxofre
$\text{Ca}(\text{OH})_2$	Portlandita
C_3S	Silicato tricálcico

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	18
1.1	OS MATERIAIS DE CONSTRUÇÃO, A SUSTENTABILIDADE E A PRESENTE PESQUISA.....	18
1.2	OBJETIVOS.....	20
1.2.1	Objetivo geral.....	20
1.2.2	Objetivos específicos.....	20
1.3	ESTRUTURA DO TRABALHO.....	21
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	22
2.1	DESENVOLVIMENTO SUSTENTÁVEL E PANORAMA DE RESÍDUOS SÓLIDOS.....	22
2.1.1	Definição.....	22
2.1.2	Classificação.....	22
2.1.3	Sustentabilidade e situação atual.....	23
2.2	AVALIAÇÃO DO CICLO DE VIDA.....	26
2.2.1	Avaliação do ciclo de vida do concreto.....	28
2.2.2	Categorias potenciais de impacto de ACV.....	29
2.3	CIMENTO PORTLAND.....	30
2.3.1	Definição.....	30
2.3.2	Composição.....	30
2.3.3	Processo de Produção.....	30
2.3.4	Tipos de Cimentos Portland.....	31
2.4	MATERIAIS POZOLÂNICOS E POZOLANICIDADE.....	32
2.4.1	Definição.....	32
2.4.2	Classificação.....	33
2.5	CONCRETO.....	34
2.5.1	Durabilidade de concretos.....	35
2.5.1.1	Fatores que influenciam a durabilidade do concreto.....	36
2.6	CINZAS VOLANTES.....	38
2.6.1	Definição e obtenção.....	38
2.6.2	Classificação e composição	39
2.6.3	Características físicas e químicas.....	39

2.6.3.1	Características físicas.....	40
2.6.3.2	Características químicas.....	41
2.6.4	O emprego de cinzas volantes.....	42
2.6.4.1	Influência do emprego de cinzas volantes em concreto.....	42
2.6.4.1.1	Influência na microestrutura e na hidratação de matrizes cimentícias.....	42
2.6.4.1.2	Influência nas propriedades do concreto a fresco.....	44
2.6.4.1.3	Influência nas propriedades do concreto endurecido.....	46
2.7	PROJETO FATORIAL E OTIMIZAÇÃO NUMÉRICA COMPUTACIONAL.....	47
3	MATERIAIS E MÉTODOS.....	48
3.1	MATERIAIS.....	48
3.1.1	Agregados.....	48
3.1.2	Cimento Portland.....	48
3.1.3	Cinza volante.....	48
3.1.4	Água.....	49
3.2	PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL.....	49
3.2.1	Seleção e caracterização de matérias-primas.....	50
3.2.1.1	Agregado miúdo e graúdo.....	50
3.2.1.2	Cinza volante.....	50
3.2.2	Escolha de parâmetros.....	50
3.2.3	Planejamento experimental.....	51
3.2.4	Processamento de misturas e obtenção de amostras para ensaios.....	52
3.2.5	Caracterização de amostras de concretos.....	53
3.2.5.1	Caracterização do concreto fresco.....	53
3.2.5.2	Caracterização do concreto endurecido – propriedades físicas e mecânicas.....	54
3.2.5.3	Caracterização do concreto endurecido - microscopia eletrônica de varredura (MEV).....	55
3.2.5.4	Caracterização do concreto endurecido - durabilidade das misturas de concreto.....	56
3.2.6	Análise estatística dos resultados e otimização numérica.....	56
3.2.7	Aplicabilidade e viabilidade econômica dos concretos.....	57
3.2.8	Caracterização ambiental do concreto.....	58
4	RESULTADOS E DISCUSSÕES I: CARACTERIZAÇÃO DAS MATÉRIAS-PRIMAS.....	59
4.1	CIMENTO PORTLAND.....	59

4.2	CINZA VOLANTE.....	59
4.2.1	Análise química.....	59
4.2.2	Distribuição granulométrica.....	60
4.2.3	Atividade pozolânica.....	61
4.3	AGREGADO MIÚDO.....	61
4.4	AGREGADO GRAÚDO.....	62
5	RESULTADOS E DISCUSSÕES II: PROPRIEDADES DOS CONCRETOS NO ESTADO FRESCO.....	63
5.1	ÍNDICE DE CONSISTÊNCIA.....	63
5.2	CALOR GERADO DURANTE A CURA COMO UMA FUNÇÃO DO TEMPO (CALORIMETRIA).....	67
6	RESULTADOS E DISCUSSÕES III – PROPRIEDADES FÍSICAS E MECÂNICAS DO CONCRETO.....	70
6.1	RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO APÓS 28 DIAS DE CURA (RC28).....	71
6.2	RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO APÓS 60 DIAS DE CURA (RC60).....	72
6.3	ABSORÇÃO DE ÁGUA (AA).....	73
6.4	ESCOLHA DOS MELHORES CONCRETOS COM PROPRIEDADES ÓTIMAS E MENOR CUSTO.....	75
6.4.1	Custo dos concretos obtidos como uma função dos materiais.....	75
6.4.2	Determinação das variáveis de misturas sujeitas às restrições na trabalhabilidade, principais propriedades no estado endurecido e custo dos materiais.....	77
6.4.3	Classificação das misturas de concreto.....	78
7	RESULTADOS E DISCUSSÕES IV: CARACTERIZAÇÕES COMPLEMENTARES DOS CONCRETOS.....	80
7.1	MICROSCOPIA ELETRÔNICA DE VARREDURA – MEV.....	80
7.2	DURABILIDADE – RESISTÊNCIA AO ATAQUE DE SULFATO (RSUL).....	82
7.3	DURABILIDADE – RESISTÊNCIA À ABRASÃO SUPERFICIAL (RAS).....	84
7.4	AVALIAÇÃO DO CICLO DE VIDA – ACV.....	85
8	CONCLUSÕES.....	89
	REFERÊNCIAS.....	91

CAPÍTULO 1 - INTRODUÇÃO

Neste capítulo será apresentada uma breve introdução sobre a indústria do cimento e a produção de concretos, contemplando o problema de pesquisa, justificativa e os objetivos do trabalho.

1.1 OS MATERIAIS DE CONSTRUÇÃO, A SUSTENTABILIDADE E A PRESENTE PESQUISA

A utilização de aglomerantes hidráulicos e agregados minerais com misturas à base de gesso e calcário acompanharam a história e a evolução da humanidade. O desenvolvimento do cimento Portland e, consequentemente, do concreto proporcionou o crescimento das cidades e do setor da construção civil (MEHTA; MONTEIRO, 2014; SCHWAAB, 2015).

No ano de 2016 foram produzidos, no Brasil, 38.708.635 toneladas de cimento Portland, colocando o país no patamar dos maiores produtores do ligante no mundo (SNIC, 2017). A indústria cimenteira, porém, é grande poluidora do meio ambiente, e responsável por cerca de 7 % do total de emissões de CO₂ na atmosfera. O setor ainda consome grandes quantidades de energia durante seu processo de fabricação (ALIABDO; ELMOATY; SALEM, 2016; RAKHIMOV *et al.*, 2017; CAMÕES, 2005).

Atualmente, o concreto é o material de construção mais utilizado no mundo, de modo que a produção, utilização e as técnicas de dosagem vêm sendo aprimoradas com o passar dos anos. A produção anual mundial corresponde a 19 bilhões de m³, o que sinaliza que esse material desempenha grande importância para o crescimento da economia das nações (PEDROSO, 2009; LIMA, 2010; SHEN *et al.* 2017; MEHTA; MONTEIRO, 2014).

Apesar da evolução tecnológica do concreto ao longo do tempo, problemas relacionados à resistência e durabilidade do material não são raros e impõem elevados custos em sua reparação no mundo inteiro (MEDEIROS JUNIOR; LIMA; BAESTRA, 2013). Em muitos locais, os aportes financeiros gastos com a recuperação das estruturas de concreto são maiores do que os recursos financeiros utilizados na construção de novas edificações (MA *et al.*, 2017).

Dessa forma, existe uma busca, nas indústrias, por técnicas, processos e materiais que visem minimizar os impactos ambientais e melhorar o desempenho desses materiais de construção do ponto de vista da durabilidade.

Por outro lado, muitos processos industriais não necessariamente ligados à construção civil geram grandes quantidades de rejeitos. O setor energético, por exemplo, ao utilizar carvão como fonte de energia em plantas de usinas termelétricas, gera toneladas de cinzas volantes todos os anos (KOOLIVAND *et al.*, 2017; KOSTOVA *et al.*, 2016; HINRICHES, 2010). E, apesar da diversificação da matriz energética mundial e da produção de energia elétrica de fontes renováveis, como a eólica e a solar, estudos afirmam que ainda se utilizará carvão como fonte de matéria-prima por um longo período de tempo (REIS, 2011). Nesse sentido, a busca por meios que visam à reutilização de rejeitos, nesse caso das cinzas volantes, é de grande valia, pois ao dispor o rejeito de maneira inadequada, acarretará em impactos ambientais.

Muitos estudos têm mostrado que as cinzas volantes apresentam propriedades pozolânicas e, na maioria das vezes, com benefícios para as propriedades mecânicas e durabilidade quando comparadas com o cimento Portland (CEZAR, 2011; CANTARELLI, 2007; SACILOTO, 2005; OLIVEIRA, 2007; PETRY, 2004). Desse modo, ao utilizar a cinza volante como substituto do cimento Portland está se poupando energia e emissão de gases na fabricação de cimento, além de ser viável economicamente, acarretando em diminuição do seu custo e aumento em sua durabilidade (MEHTA; MONTEIRO, 2014; AHMARUZZAMAN, 2010).

Da mesma forma, há espaço para novas pesquisas, principalmente quando tratados a durabilidade, as propriedades mecânicas e o custo dos materiais para fabricação do concreto de forma conjunta. Além de avaliar o impacto ambiental gerado pelos componentes do concreto, reafirmando sua aplicabilidade no mercado e a sustentabilidade.

Diante desse contexto, a presente pesquisa visa substituir, de forma parcial, o cimento Portland por um tipo específico de cinza volante, gerada como rejeito em uma empresa de Santa Catarina, na produção de concretos estruturais. A investigação contemplará o processamento de misturas de concretos com agregados, cimento Portland e cinza volante obtidas a partir de um planejamento estatístico, assim como as análises de resultados, os quais incluem as propriedades físicas, mecânicas, ambientais e de durabilidade, como também o custo dos materiais para a produção do concreto, além da sua aplicabilidade na construção civil.

1.2 OBJETIVOS

Os objetivos deste trabalho estão subdivididos em geral e específicos, e são apresentados a seguir.

1.2.1 Objetivo geral

O objetivo deste trabalho é investigar o efeito da substituição parcial de cimento Portland por cinza volante como material cimentício em concretos estruturais.

1.2.2 Objetivos específicos

- Avaliar, por meio de análises químicas e físicas, a potencialidade do uso de cinza volante quanto a suas características de pozolanicidade;
- Desenvolver um planejamento experimental, por meio de projeto fatorial fracionado, para delineamento de misturas, para a produção de concretos contendo cimento, cinza volante e agregados;
- Aplicar ferramentas estatísticas e de metodologia de superfícies de respostas para a avaliação das propriedades como uma função do teor de cinza, relações água/ligante e agregado/ligante;
- Correlacionar as características físicas, mecânicas, microestruturais, durabilidade e ciclo de vida das misturas de concretos, do ponto de vista dos seus impactos na sociedade;
- Fazer uma estimativa de parâmetros para a produção de concretos com custo reduzido e propriedades específicas para uso como em aplicações estruturais de construção civil;
- Contribuir com uma alternativa para a obtenção de materiais de construção sustentáveis, por meio do uso do rejeito de cinza volante do ponto de vista técnico, econômico e sustentável.

1.3 ESTRUTURA DO TRABALHO

O presente trabalho está estruturado em cinco partes principais, detalhadas a seguir:

No primeiro capítulo, situa-se a introdução, objetivos geral e específicos e, ainda, a estrutura do trabalho.

No segundo capítulo está situado o referencial teórico, que contém informações acerca do tema, tais como cinza volante, concreto, gestão de resíduos e avaliação de ciclo de vida.

O terceiro capítulo é composto do programa experimental do trabalho, com a descrição de todos os materiais utilizados, bem como a metodologia da pesquisa e os ensaios realizados.

Os resultados e discussões estão divididos em quatro capítulos. A primeira parte é compreendida pela caracterização das matérias-primas utilizadas no trabalho. A segunda parte corresponde aos resultados de caracterização do concreto fresco. A terceira apresenta as características físicas e mecânicas dos concretos, juntamente com o processo de otimização numérica, custo e aplicabilidade do mesmo. A quarta parte mostra as caracterizações complementares dos concretos, abrangendo a micrografia, durabilidade e avaliação do ciclo de vida.

No quinto, e último capítulo, estão expostas as considerações finais da pesquisa, bem como as sugestões para o desenvolvimentos de trabalhos futuros.

CAPÍTULO 2 - REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

A revisão bibliográfica apresenta informações necessárias e relevantes para a compreensão do tema e traz conceitos e discussões sobre gestão de resíduos sólidos, materiais pozolânicos, propriedades e durabilidade de concretos, entre outros.

2.1 DESENVOLVIMENTO SUSTENTÁVEL E PANORAMA DE RESÍDUOS SÓLIDOS

O capítulo de desenvolvimento sustentável traz a definição e a classificação dos resíduos sólidos, além de uma abordagem sucinta sobre a utilização do carvão como matéria-prima na fabricação de energia elétrica e a geração da cinza volante.

2.1.1 Definição

A Política Nacional de Resíduos Sólidos, lei 12.305 (BRASIL, 2010), define o termo como uma substância que é descartada em seu estado sólido ou semissólido, proveniente de atividades humanas e que, para o seu descarte, são exigidas soluções técnicas adequadas. A NBR 10004 “Resíduos Sólidos – Classificação” (ABNT, 2004) relaciona os setores industriais com o material resultante, além de mencionar os potenciais riscos ao meio ambiente e à saúde pública

2.1.2 Classificação

Os Resíduos Sólidos podem ser classificados de acordo com seu uso ou grau de periculosidade e potencial risco ao meio ambiente e à saúde pública.

A NBR 10004 (ABNT, 2004) classifica os resíduos sólidos segundo a sua periculosidade e em duas classes distintas: Resíduos Classe I (Perigosos) e Resíduos Classe II (Não-Perigosos), estando essa última classe subdividida em Classe II A (Resíduos Não-inertes) e Classe II B (Resíduos Inertes).

Os resíduos considerados perigosos são os que possuem características de inflamabilidade, corrosividade, reatividade, toxicidade e patogenicidade ou, ainda, substâncias presentes nos anexos A e B da norma (ABNT, 2004).

A NBR 10004 (ABNT, 2004) classifica, ainda, os resíduos não perigosos em inertes e não inertes. Os considerados inertes são aqueles que quando submetidos ao contato com a água, não têm nenhum dos seus componentes solubilizados a concentrações superiores aos padrões de potabilidade, tais como aspecto, turbidez, sabor, cor e dureza. Os resíduos não inertes contêm características de biodegradabilidade, combustibilidade ou solubilidade.

Em contrapartida, a lei 12.305 (BRASIL, 2010) classifica os resíduos de acordo com sua origem, tais como: resíduos domiciliares, de limpeza urbana, resíduos sólidos urbanos, resíduos provenientes dos serviços públicos de saneamento básico, resíduos industriais, resíduos provenientes de serviços da saúde, da construção civil, agrossilvopastoris, resíduos de transportes e mineração.

2.1.3 Sustentabilidade e situação atual

Toda atividade humana ou industrial gera resíduos, que muitas vezes podem ser tóxicos ou perigosos, e que causam danos ao meio ambiente e à saúde humana assim que descartados. A origem e composição do material a ser descartado estão estreitamente ligados às soluções no seu armazenamento, transporte ou disposição final. É importante estudar técnicas que visam a reutilização desses rejeitos, buscando uma diminuição de volume nas áreas de disposição final. Além disso, muitas vezes, a reutilização desses rejeitos se torna vantajosa em aplicações nobres e em situações que envolvam maior valor (FUNGARO; IZIDORO; ANDRADE, 2007).

Hinrichs (2010) afirma que o setor de produção de energia elétrica é de suma importância para a sociedade atual, bem como necessário para a produção de bens e serviços. O setor se baseia na extração de recursos naturais para a produção de energia elétrica. Na obra são relacionados os diversos tipos de matérias-primas, renováveis ou não, para a produção de energia elétrica, tais como: água, vento, petróleo, gás natural, carvão natural, entre outros; com as suas reservas disponíveis e economicamente exploráveis.

Dentre essas matérias primas, a disponibilidade de reservas de carvão faz com que muitos países tenham o material como principal fonte para a produção de energia elétrica. No Brasil, a participação do carvão na produção de energia apesar de antiga, é pequena. E é utilizada principalmente de forma complementar, quando os níveis das barragens hidroelétricas estão baixos (PEREIRA; ALMEIDA, 2015).

Segundo dados da Agência Nacional de Energia Elétrica Brasileira – ANEEL (2017), a matriz energética nacional é compreendida por fontes renováveis e não renováveis, compostas

por potenciais de biomassa (8,91 %), eólico (6,38 %), hídrico (61,33 %), nuclear (1,25 %), solar (0,01 %) e fóssil (16,93 %). Destes 2,27 % provém do carvão mineral.

No país, existem hoje, em funcionamento, 13 usinas termelétricas que utilizam o carvão mineral como matéria-prima. Elas estão localizadas, em sua maioria, nos estados do Rio Grande do Sul e Santa Catarina. Porém, há também usinas no Paraná, Pará, Maranhão e Ceará (ANEEL, 2017). A localização dessas usinas está intimamente ligada à localização das jazidas de carvão. A Figura 1 representa a localização das Usinas Termelétricas no país.

Figura 1 - Localização das usinas termelétricas no Brasil



Fonte: Google Maps (2017) – adaptado.

A Figura 1 ilustra a localização das usinas termelétricas no país. Cada flecha vermelha representa uma usina. Percebe-se a maior presença no sul do Brasil, com destaque para o Rio Grande do Sul (quatro plantas) e Santa Catarina (três plantas). Além disso, os estados do nordeste do Brasil, Ceará e Maranhão, possuem duas plantas cada uma. Os estados do Pará e do Paraná possuem uma planta cada um.

Dessa forma, há uma discussão global pela utilização de matérias-primas renováveis para a produção de energia elétrica. Reis (2011) elucida que todas as previsões atuais de evolução da matriz energética mundial estimam uma maior participação de energias renováveis,

porém também indica que os combustíveis fósseis, incluindo o carvão, ainda terão grande importância no século XXI.

Esse fato se deve à disponibilidade de reservas de carvão em inúmeros países. O Instituto de Geociências e Recursos Naturais da Alemanha estima que existem 968,2 bilhões de toneladas de carvão depositadas em reservas no mundo, representando o equivalente a 120,7 anos de consumo, seguindo a atual produção de energia elétrica. Outra estimativa do tamanho das reservas de carvão, pelo Conselho Nacional de Energia, apresenta 891 bilhões de toneladas de carvão em reservas, suficiente para 110 anos de consumo (WORLD COAL ASSOCIATION, 2015).

Zancheta, Meldonian e Poli (2005) afirmam que na utilização desse potencial, onde há a extração do carvão e a geração de energia elétrica em usinas termelétricas com a queima do material, são gerados resíduos sólidos e gasosos.

A grande produção de rejeitos gasosos, entre eles o CO₂, que é agravador do aquecimento global, direciona o setor ao segundo maior da indústria em emissão de gases, emitindo menos que o setor de transportes (ZANCHETA; MELDONIAN; POLI, 2005).

Dessa forma, os resíduos sólidos gerados nesse processo resultam na produção de cinzas volantes e pesadas. E a disposição desses materiais oferece potencial perigo para o solo e para os recursos hídricos, pela contaminação por lixiviação e contaminação de lençóis freáticos e rios, respectivamente (FUNGARO; IZIDORO; ANDRADE, 2007).

A utilização das cinzas volantes na fabricação de concretos tem sido estudada há décadas em decorrência dos benefícios econômicos e técnicos proporcionados ao produto final (HORNAIN; MIERSMAN; MARCHAND, 1992). E, por causa da sua heterogeneidade, existem dificuldades na utilização do material, justificando as recorrentes pesquisas realizadas encontradas na literatura. (NOGUEIRA, 2011). Grande parte dos estudos que tratam da substituição de cimento Portland por cinzas volantes no concreto apresenta as propriedades mecânicas correlacionando com sua durabilidade (CEZAR, 2011; CANTARELLI, 2007; SACILOTO, 2005).

Recena (2011) estudou um método de dosagem de concretos contendo cinzas volantes, Brizola (2007) pesquisou a microestrutura de concretos com cinza volante, e Beck (2009) estudou as propriedades elásticas e de deformação do concreto.

A carbonatação de concretos com cinzas volantes foi bem aprofundada em estudos como o de Pires (2016), Ferreira (2013) e Tasca (2012). Outros estudos se aprofundam em diferentes características de durabilidade, tais como sua resistividade elétrica, penetração de

cloreto e permeabilidade (CEZAR, 2011; OLIVEIRA, 2007; PETRY, 2004). Os trabalhos que estudaram a penetração de cloreto trouxeram resultados que sinalizam a perda de resistência do material exposto à solução. Além disso, há poucas pesquisas que estudam a resistência à ação de sulfatos e à abrasão superficial de concretos com cinzas volantes.

Pozzobon, Rocha e Cherif (2000) estudaram a comercialização da cinza volante produzida no complexo Jorge Lacerda em Santa Catarina e concluíram que sua utilização sempre foi restrita à indústria cimenteira. Além disso, os autores apresentam a produção de 42 toneladas de cinza volante para cada 100 toneladas de carvão mineral.

Junckes (2015) mostrou a influência da adição de cinza volante catarinense na elevação da temperatura de concretos de blocos de fundações. O autor concluiu que a cinza volante não proporcionou diminuição no coeficiente de elevação adiabática de temperatura, porém retardou, em até 18 horas, o início da elevação de temperatura. Além disso, os concretos expostos à cura a 40°C obtiveram resistência superior aos concretos curados a temperatura ambiente.

Nardi (2004) revelou um processo de otimização para misturas pozolânicas, se utilizando, também, de cinzas catarinenses, mas se restringiu a ensaiar o índice de consistência e sua resistência a tração, afirmando a viabilidade na utilização de cinzas do estado, em concretos.

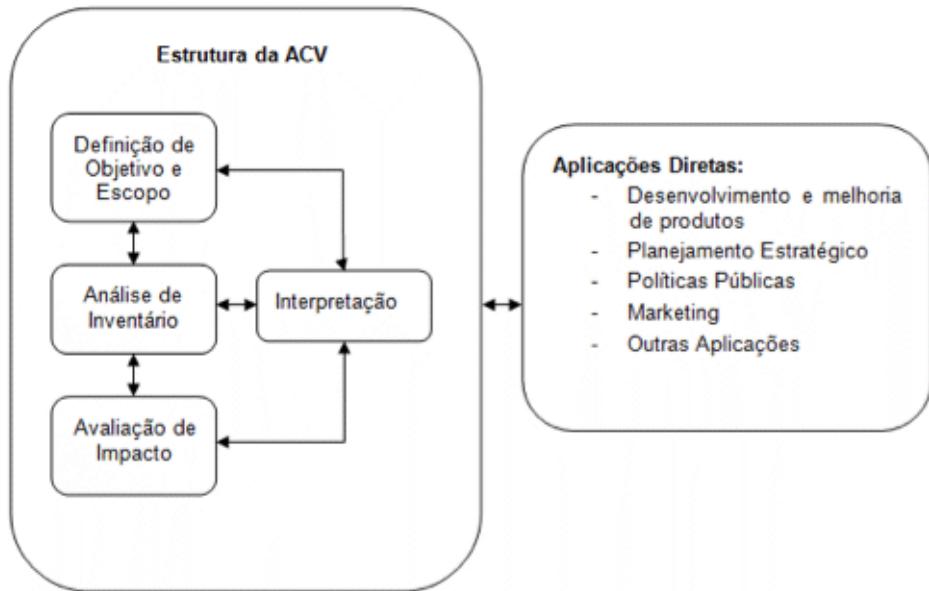
Pozzobon (1999) abordou a incorporação da mesma cinza volante como fator econômico e ambiental, na utilização do rejeito industrial. O trabalho mostrou a viabilidade da utilização da cinza como material de enchimento no concreto e em outras funções na construção civil.

2.2 AVALIAÇÃO DO CICLO DE VIDA

A avaliação do ciclo de vida (ACV) pode ser definida como uma técnica para a avaliação dos aspectos ambientais e potenciais impactos associados ao longo da vida de um produto, desde a aquisição das matérias-primas, produção, uso e disposição final. Além disso, são analisados o uso de recursos, a saúde humana e as consequências ecológicas que envolvem todo esse ciclo (ABNT, 2014a).

Para a elaboração da avaliação, ficam estabelecidas quatro etapas principais: a definição dos objetivos e do escopo, análise do inventário, avaliação de impacto dos resultados do inventário e a interpretação de todos os resultados de forma conjunta (ABNT, 2014a; MENDES, BUENO, OMETTO, 2016). Conforme ilustra a Figura 2.

Figura 2 - Fases de uma avaliação de ciclo de vida



Fonte: ABNT (2014a)

A primeira fase é compreendida pela definição do escopo e dos objetivos declara a aplicação pretendida, as razões pela execução do estudo, o público-alvo, o sistema do produto estudado assim como seus requisitos, limitações, detalhamento e a unidade funcional (ABNT, 2014a; BORGES *et al.* 2014).

Na segunda fase há o levantamento e coleta dos dados de entrada e saída do sistema estabelecido na primeira fase, por meio de um processo interativo. Dessa forma são contabilizadas as entradas de energia e matérias-primas, saída de coprodutos e resíduos, além de emissões atmosféricas (ABNT, 2014a; PASSUELLO *et al.*, 2014).

A terceira fase comprehende a avaliação do impacto do ciclo de vida com informações adicionais, de modo a compreender de forma clara a significação ambiental dos resultados. Existem diversos potenciais de impacto que podem ser aplicados nessa etapa, entre eles estão: mudança climática, depleção do ozônio estratosférico, eutrofização, acidificação da água e do solo, depleção de recursos abióticos fósseis e não fósseis, ozônio fotoquímico, entre outros métodos (PASSUELLO *et al.* 2014; BORGES *et al.*, 2014).

A quarta e última fase do processo de ACV representa a identificação de questões interessantes e significativas de análise, servindo de base para a concepção do produto avaliado, por meio dos resultados obtidos nos quesitos analisados na terceira fase (ABNT, 2014a; PASSUELLO *et al.* 2014; BORGES *et al.*, 2014).

2.2.1 Avaliação do ciclo de vida do concreto

O concreto é um dos materiais de construção mais difundidos no mundo. Sua produção é responsável pela emissão de grandes quantidades de gases de efeito estufa, e grande consumo de energia. Além disso, consome significativas quantidades de materiais e recursos naturais (WANG *et al.*, 2017).

Na produção de cimento Portland, são geradas grandes quantidades de CO₂, e cerca de metade dessa emissão é liberada durante o processo de clinquerização, no qual as matérias-primas são fundidas a aproximadamente 1500°C. A outra parte de emissões provém da queima dos combustíveis no forno de clinquerização (SNIC, 2011).

O consumo de energia térmica pode chegar a 3.300 MJ/t de clínquer produzido, enquanto o consumo de energia elétrica é estimado entre 90 e 120 kWh/t de cimento produzido (PAULA, 2009).

A substituição de cimento Portland por adições minerais tem sido uma alternativa bem difundida para a diminuição da demanda de energia e de recursos naturais e, também, da diminuição da emissão de gases nocivos ao meio ambiente, além da economia na queima de combustíveis fósseis (BORGES *et al.*, 2014). As minimizações citadas ocorrem, principalmente, durante o processo de clinquerização (WANG *et al.*, 2017).

A aplicação da metodologia de ACV no setor da construção civil é nacional e internacionalmente reconhecida e aplicada, entre outros, em materiais que envolvam o cimento (VALDERRAMA *et al.*, 2011; HUNTZINGER; EATMON, 2009). E esses impactos relativos ao ciclo de vida dos produtos estão ligados às características do local de aplicação do estudo (PASSUELLO *et al.*, 2014).

Algumas pesquisas já trataram do tema de análise do ciclo de vida de materiais de construção civil, inclusive do concreto. Borges *et al.* (2014) compararam por meio desse método os concretos geopoliméricos e concretos convencionais com cimento Portland CPII, e mostraram que o concreto geopolímérico apresenta menor emissão de CO₂ e menor consumo energético, por utilizar resíduos industriais em sua produção, como substituto ao cimento Portland.

Outra pesquisa, de Park, Tae e Taehyung (2012), estudou a substituição de cimento Portland por pozolanas, tais como a cinza volante e a escória de alto-forno, e concluiu que a emissão de CO₂ foi 47% menor que concretos convencionais.

Gasques *et al.*, (2014) mencionaram em sua pesquisa os impactos ambientais ocasionados pela areia natural e rocha britada. Os impactos oriundos da extração da areia englobam a poluição sonora, visual e atmosférica, modificação dos regimes hídricos e aumento da turbidez em cursos d’água, geração de estresse e perturbação à flora e a fauna, entre outros (SOUZA; SALLES, 2012). Além disso, o transporte do material até o local de utilização também merece destaque (JOHN, 2011).

Rossi e Sales (2012) discutem sobre a avaliação do ciclo de vida de rocha britada, citando seu transporte como grande emissor de CO₂ e potencializador do custo do material, além de citar o processo de britagem da pedra, que demanda grandes quantidades de energia elétrica.

2.2.2 Categorias potenciais de impacto de ACV

Dentre as diversas categorias potenciais de impacto, o potencial de aquecimento global e de esgotamento de recursos abióticos fósseis são as listadas com maior frequência em pesquisas da área da construção civil e de concreto (SOMBrio, 2015; SAADE; SILVA; GOMES, 2014) e, por isso, foram as categorias de impacto estudadas no presente trabalho.

O potencial de aquecimento global (PAG) ou ainda, potencial de mudança climática, refere-se à mudança na temperatura global causada pelo efeito estufa, que acontece devido aos gases liberados na atmosfera pela atividade humana, chamados de gases do efeito estufa, como o dióxido de carbono (BRE, 2008; SOMBrio, 2015).

Conforme apresenta Bre (2008), existe um consenso entre os pesquisadores, de que o crescimento das emissões de gases do efeito estufa contribuem com as alterações climáticas. O aquecimento global causa inúmeros prejuízos ao meio ambiente e à saúde humana. Ele é expresso em Potencial de Aquecimento Global e a unidade utilizada é Kg CO₂ equivalente.

A categoria de impacto Potencial de Depleção de Recursos Abióticos Fósseis (PDA) é relativa ao consumo de combustíveis fósseis, que são finitos e poderão não estar disponíveis eternamente, também é relativamente importante para a construção civil, pois aprofundaria os impactos referentes à extração de matérias-primas como os agregados, e também, as matérias-primas para a produção do cimento Portland (BRE, 2008; SOMBrio, 2015).

2.3 CIMENTO PORTLAND

Essa subseção traz embasamento sobre a definição de cimento Portland, sua composição, produção e forma nacional de venda do produto.

2.3.1 Definição

Mehta e Monteiro (2014) definem o cimento como um material seco, fino e com propriedade aglomerante. Além de ser hidráulico quando os seus produtos ficam estáveis sob meio aquoso, possuindo os silicatos de cálcio como responsáveis por essa estabilização. A NBR 12655 (ABNT, 2015c) define o cimento Portland como um aglomerante hidráulico, obtido da moagem do clínquer e que é adicionado uma ou mais formas de sulfato de cálcio, com a possibilidade de adição de materiais pozolânicos durante o processo de fabricação.

2.3.2 Composição

O cimento Portland é formado, principalmente, de calcário, sílica, alumina e óxido de ferro. Essas substâncias reagem entre si e dão origem a uma série de outros produtos, até alcançar um estado de equilíbrio químico (NEVILLE; BROOKS, 2013). Nogueira (2011) apresenta os principais componentes do cimento Portland em seu trabalho, destacando a presença de mais de 50 % de silicatos, além de outros produtos, conforme o Quadro 1.

Quadro 1 - Composição do cimento Portland

COMPOSTO	CONSTITUIÇÃO	SÍMBOLO	TEOR (%)
Silicato tricálcico	$3\text{CaO}\cdot\text{SiO}_2$	C3S	42-60
Silicato dicálcico	$2\text{CaO}\cdot\text{SiO}_2$	C2S	10-35
Aluminato tricálcico	$3\text{CaO}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3$	C3A	6-13
Ferroaluminato tetracálcico	$4\text{CaO}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3\cdot\text{Fe}_2\text{O}_3$	C4AF	5-12

Fonte: NEVILLE e BROOKS (2013) - adaptado.

2.3.3 Processo de Produção

O processo de produção de cimento é altamente poluidor para o meio ambiente. Estima-se que para cada tonelada de cimento Portland fabricado, seja emitido uma tonelada de CO₂. E por isso, a indústria cimenteira é responsável pela emissão de 5 a 7 % de CO₂ em todo o mundo. Já a emissão de CO₂ é responsável por 65 % do total de gases do efeito estufa (ALIABDO; ELMOATY; SALEM, 2016). Apesar disso, a indústria cimenteira nacional apresenta níveis

baixos de emissão, o que tem levado ao patamar de uma das mais eficientes do mundo (BATTAGIN; RODRIGUES, 2014). Lima (2010) estima que sejam gerados, no país, 0,659 toneladas de CO₂ para cada tonelada de cimento fabricado. Mehta e Monteiro (2014) estimam que o consumo atual de concreto no mundo seja cerca de 19 bilhões de toneladas ao ano.

A produção do cimento se inicia na britagem do calcário e da argila. O clínquer é originário da moagem, mistura e queima a 1400°C da matéria-prima até a fundição total do material e formação de pelotas. Ao final, são adicionados cerca de 3 % de gesso cuja finalidade é de controlar a pega e permitir o manuseio do material. Ainda podem ser adicionados, no final, certos tipos de pozolanas ao produto, antes de ser ensacado (NEVILLE; BROOKS, 2013).

2.3.4 Tipos de Cimentos Portland

No mercado brasileiro, existem atualmente cinco tipos básicos de cimento, além de três tipos especiais. Embora todos sejam destinados para uso geral na construção civil, cada um possui características específicas que os tornam mais adequados para certos usos, conferindo ao concreto uma boa resistência e durabilidade, de forma econômica (PUGLIESI, 2016; BATTAGIN; RODRIGUES, 2014). O Quadro 2 apresenta os tipos de cimento presentes no mercado nacional, sua normatização e adições.

Quadro 2 - Tipos de cimentos disponíveis no mercado nacional

Tipo de Cimento	Norma Brasileira	Adições
Cimento CP-I	NBR 5.732	Sem adição
Cimento CP-I S		Contém de 1 a 5 % de gesso
Cimento CP-II Z	NBR 11.578	Contém de 6 a 14 % de material pozolânico e até 10% de material carbonático
Cimento CP-II E		Pode conter de 6 a 34 % de escória de alto forno e até 10 % de material carbonático.
Cimento CP-II F		Contém de 6 a 10 % de material carbonático
Cimento CP-III	NBR 5.735	Contém de 35 a 70 % de escória granulada de alto forno e até 10 % de material carbonático
Cimento CP-IV	NBR 5.736	Contém de 15 a 50 % de material pozolânico e até 5 % de material carbonático
Cimento CP-V ARI	NBR 5.733	Sem adição
Cimento RS	NBR 5.737	Sem adição
Cimento Branco	NBR 12.989	Sem adição
Cimento Portland de Baixo Calor de Hidratação	NBR 13.116	Sem adição

Fonte: ABNT (1991a), ABNT (1997), ABNT (1991c), ABNT (1999), ABNT (1991b); ABNT (1992a); ABNT(1993) e ABNT (1994).

O CP-I foi o primeiro cimento a ser lançado no mercado nacional, ele não possui nenhum tipo de adição além do gesso, que tem a função de retardador de pega. Com o amplo domínio científico sobre o cimento Portland comum, pôde-se desenvolver cimentos com adições, como o CP-II, que não só mantivessem as propriedades do cimento comum, mas também melhorassem algumas propriedades (ABCP, 2002). Além disso, apesar da disponibilidade dos tipos de cimento variar de acordo com a região do país, o CP-II é o que possui maior facilidade de ser encontrado no mercado, além de ser o mais consumido (PUGLIESI, 2016).

Os cimentos Portland de Alto-Forno e Pozolânicos, CP-III e CP-IV respectivamente, possuem adição de resíduos industriais que proporcionam ao material final melhores propriedades pelo fato de reagirem de forma diferente com a água ou com o hidróxido de cálcio. Além de conseguirem uma redução energética significativa na incorporação com o ligante (ABCP, 2002).

2.4 MATERIAIS POZOLÂNICOS E POZOLANICIDADE

A seguir são apresentados a definição e a forma de classificação dos materiais pozolânicos.

2.4.1 Definição

Materiais pozolânicos são aluminosilicatos ou silicatos, com pouca atividade aglomerante que, reduzidos a pó, na presença de água e em temperatura ambiente, reagem com o hidróxido de cálcio formando um material com propriedades aglomerantes (ABNT, 1992b).

Esses materiais podem ter origem natural/vulcânica, com caráter petrográfico ácido e composto de 65 % de SiO₂ ou de origem sedimentar; ou artificial, provenientes de subprodutos de indústrias com pozolanicidade ou de tratamento térmico (ABNT, 1992b).

As pozolanas têm como sua principal propriedade a reação e combinação com o hidróxido de cálcio, que forma produtos estáveis, com características aglomerantes. Dessa maneira, a liberação dos hidróxidos de cálcio pelo processo de hidratação dos silicatos resulta na reação com a pozolana, usada como substituto parcial do cimento Portland e na formação de silicatos de cálcio extras, mais estáveis que os resultantes da reação com o cimento Portland

(OLIVEIRA; BARBOSA, 2006). A reação entre a pozolana e o hidróxido de cálcio é denominada atividade pozolânica (TUTIKIAN; DAL MOLIN, 2011).

Existem diversos tipos de materiais e resíduos que podem ser utilizados como pozolanas, tal como a escória de alto forno, a sílica ativa, o metacaulim, a cinza de casca de arroz e as cinzas volantes (MEHTA; MONTEIRO, 2014).

O emprego de adições minerais em concretos tem sido estudado há alguns anos, assim como o trabalho de Silveira (1996), que afirma que a utilização de pozolanas em concretos tem influência benéfica, pois causa significativas alterações em sua microestrutura, ofertando ao material uma menor permeabilidade e tornando-o mais resistente e menos vulnerável à ação de agentes agressivos, principalmente de origem química.

A utilização desses rejeitos como pozolanas tem se intensificado nos últimos anos, assim como há a minimização dos impactos ambientais do descarte desses materiais no meio ambiente por meio da sua reutilização. A minimização no consumo de matérias-primas e também de energia na produção do ligante, além da redução de custos do produto final contendo esse rejeito e a preservação do meio ambiente, são fatores que motivam a utilização desses materiais (PATRICIO *et al.*, 2013; GARCIA *et al.*, 2015).

2.4.2 Classificação

A NBR 12653 – Materiais Pozolânicos (ABNT, 2014b) classifica os materiais pozolânicos em três classes distintas, conforme apresentado pelo Quadro 3.

Quadro 3 - Tipos de materiais pozolânicos

Classe N	Pozolanas naturais e artificiais, como materiais vulcânicos petrográficos, cherts silicosos, terras diatomáceas e argilas calcinadas.
Classe C	Cinzas volantes produzidas pela queima de carvão mineral
Classe E	Qualquer pozolana com características diferentes das classes C e N.

Fonte: ABNT (2014b).

Estão inclusos na classe N as pozolanas como o metacaulim e as cinzas vulcânicas naturais. Na classe C, enquadram-se todas as cinzas oriundas do processo de geração de energia em usinas termelétricas (ABNT, 2015a). Um exemplo de pozolana classe E é a cinza do bagaço de cana (FERREIRA; ANJOS; BORJA, 2010). Além disso, a norma ainda estabelece exigências químicas e físicas para as pozolanas, conforme as Tabelas 1 e 2.

Tabela 1 - Exigências químicas dos materiais pozolânicos

Propriedades	Classes de Materiais Pozolânicos		
	N	C	E
(%) mínima de $\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3$	70		50
(%) máxima de SO_3	4	5	
(%) máxima de teor de umidade		3	
(%) máxima de perda ao fogo	10	6	
(%) máxima de álcalis disponíveis em Na_2O		1,5	

Fonte: ABNT (2015a).

Tabela 2 - Exigências físicas dos materiais pozolânicos

Propriedades	Classes de material pozolânico		
	N	C	E
(%) máxima de material retido na peneira 45 μm		20	
(%) mínima, em relação ao controle, de atividade pozolânica, com cimento aos 28 dias		90	
Índice de atividade pozolânica com o cal aos 7 dias (MPa)		6	

Fonte: ABNT (2015a).

Dentre as pozolanas existentes, a cinza volante é o objeto de pesquisa deste trabalho.

2.5 CONCRETO

Concreto é definido como “um material compósito que consiste, essencialmente, de um meio aglomerante no qual estão aglutinadas partículas ou fragmentos de agregado” (MEHTA; MONTEIRO, 2014, p. 13). Além de ser uma mistura hidráulica composta de cimento, agregado, água e, frequentemente, aditivos.

Existem diversos tipos de concreto, entre eles estão os concretos com função estrutural, que ainda podem ser subdivididos em três categorias: de baixa, moderada e alta resistência. Os concretos estruturais com moderada resistência são os mais utilizados e possuem resistência a compressão variando entre 20 e 40 MPa, após 28 dias de idade (MEHTA; MONTEIRO, 2014).

A pasta de cimento representa cerca de 25 a 40 % do concreto endurecido e é composta de 7 a 15 % de cimento, 14 a 21 % de água e 8 % de ar em volume. Além disso, os agregados representam 60 a 75 % do volume total de concreto. Para se ter uma dosagem adequada dos materiais, é necessário que haja uma harmonia entre a qualidade e a quantidade desses componentes (KOSMATKA; PARANESE, 1994).

A dosagem do concreto vai influenciar as propriedades mecânicas e também microestruturais do material. Haverá relação entre a quantidade de concreto e o índice de vazios. Além disso, a zona de transição do concreto, que é um ponto importante, vai variar, pois é uma zona de pouca resistência (MEHTA; MONTEIRO, 2014).

O estado fresco do concreto pode ser entendido como o período em que se inicia a pega do aglomerante. É delineada por características importantes, tal como a sua trabalhabilidade, densidade, tempo de pega, entre outros. (MEHTA; MONTEIRO, 2014; SCHWAAB, 2015).

A trabalhabilidade do concreto fresco é definida como a propriedade que determina o esforço exigido para manipular uma quantidade mínima de concreto fresco, com mínima perda de homogeneidade (MEHTA; MONTEIRO, 2014). A trabalhabilidade pode ser determinada pelo ensaio de abatimento do cone (*slump test*) (ABNT, 1998).

O estado endurecido do concreto pode ser definido como a mistura final de seus componentes, a partir do momento em que esses componentes não reagem mais entre eles. Esse estado final deve possuir condição de suportar os esforços impostos para a sua utilização. O ensaio de mensuração mais utilizado no concreto endurecido é a resistência à compressão. Essa resistência é definida como a medida da quantidade de tensão necessária para que o material se rompa. Além do ensaio de resistência à compressão, existem ensaios de resistência à tração, flexão, cisalhamento e torção (MEHTA; MONTEIRO, 2014).

2.5.1 Durabilidade de concretos

Mehta e Monteiro (2014, p. 126), ao discutir sobre o tema o definem como: “a capacidade de resistir à ação de intempéries, ao ataque químico, à abrasão, e outras condições de serviço”. Além disso, relacionam a durabilidade do concreto com a sua vida útil e a preservação da sua forma, qualidade e a capacidade de uso ao ser exposto ao ambiente na qual fora projetado.

Os autores afirmam, ainda, que um material atinge o fim da sua vida útil assim que suas propriedades tiverem sido deterioradas de tal forma que sua utilização tenha se tornada insegura e antieconômica. Em sua obra, são listados alguns parâmetros de avaliação da durabilidade de concretos, entre eles a resistência à penetração de ácidos, cloretos, sulfatos, desgaste superficial, ação do gelo e do fogo, reação álcali-sílica, entre outros. A seguir são tratados alguns desses fatores que influenciam a durabilidade de concretos.

2.5.1.1 Fatores que influenciam a durabilidade do concreto

a. Porosidade e permeabilidade

Neville e Brooks (2013) relacionam o termo porosidade com a facilidade com que os líquidos e gases possam se movimentar através do concreto. Mehta e Monteiro (2014) estabelecem a água de amassamento como fator crucial da permeabilidade da pasta de concreto, pois ela determina o espaço total e também o espaço não preenchido depois de toda água ter sido consumida pelas reações de hidratação, ou ainda, pela evaporação do ambiente.

Com o desenvolvimento da hidratação, a porosidade cresce e a permeabilidade diminui. Não há, porém, uma proporcionalidade entre tais fatos. Além disso, quanto maior for a relação agregado/ligante, maior será a permeabilidade. Tal fato ocorre pelas microfissuras presentes na zona de transição na interface entre o agregado e a pasta de cimento, que mais tarde estabelecem interconexões que facilitam a permeabilidade do material (MEHTA; MONTEIRO, 2014).

A permeabilidade do concreto pode ser controlada com a diminuição do volume de vazios capilares da pasta. Baixa relação água/cimento, consumo adequado do ligante, cura e adensamento adequados são fatores que auxiliam na redução da permeabilidade do concreto (MEHTA; MONTEIRO, 2014).

b. Desgaste superficial por abrasão

Mehta e Monteiro (2014) definem a abrasão superficial do concreto como a perda progressiva de massa da superfície que ocorre por meio seco, sendo comum em pavimentos industriais e em locais com tráfego de veículos. Esse desgaste pode ocorrer por fricção, raspagem, derrapagem ou deslizamento de objetos na superfície do material (KUMAR, 2017).

A resistência à abrasão superficial é afetada por inúmeros parâmetros internos do concreto, o que inclui o tipo de agregado miúdo, graúdo e sua proporção, a resistência do concreto, o traço, a utilização de pozolanas ou fibras, o método de acabamento superficial e a utilização de aditivos químicos (RAO; SRAVANA; RAO, 2016; KUMAR, 2017).

Neville e Brooks (2013) relacionam a importância da resistência mecânica do concreto e a sua cura úmida prolongada para maior resistência à abrasão superficial. Concretos com pouca exsudação e com maior resistência na camada superficial se comportam melhor à abrasão do que concretos porosos e leves.

Mehta e Monteiro (2014) discutem que, para condições extremas de abrasão superficial, o concreto deverá ter no mínimo 41 MPa de resistência a compressão. Além disso, a dimensão máxima dos agregados graúdos deverá ser de 12,5 mm e a mistura deverá ter baixa relação água/cimento.

Silva (2011) afirma que a resistência à abrasão está relacionada com o desempenho funcional do concreto e o conhecimento do comportamento do material frente à abrasão permite o controle de qualidade e adequação ao uso projetado.

Existem três metodologias para a determinação da resistência a abrasão superficial de concretos. Uma metodologia é a estabelecida pela Associação Brasileira de Normas Técnicas, NBR 12042 (ABNT, 2012), outra foi criada pela *American Society for Testing and Materials*, ASTM C 779 (ASTM, 2012); e, por último um método da Fundação de Ciência e Tecnologia do Rio Grande do Sul (CIENTEC, 2016).

A Fundação de Ciência e Tecnologia do Rio Grande do Sul desenvolveu uma metodologia própria para a simulação do desgaste por abrasão que consiste na simulação de um percurso de 500 m percorridos por corpos de prova de 50 mm x 50 mm a uma pressão de 0,06 MPa. O material abrasivo utilizado é o carbeto de silício e o resultado é mensurado pela média do desgaste em cinco pontos do corpo de prova, em milímetros (CIENTEC, 2016).

c. Ataque por sulfatos

O concreto exposto ao ataque por sulfatos apresenta aparência esbranquiçada, com deterioração nas bordas, lascamento e fissuração. Além disso, pode ocorrer, também, expansão da massa. A fissuração aumenta a permeabilidade do concreto e acelera o seu processo de deterioração. Já a expansão pode ocasionar problemas estruturais graves. Todos os fatores apresentados propiciam diretamente perda progressiva da resistência do concreto (MEHTA; MONTEIRO, 2014; NEVILLE; BROOKS, 2013; ZHANG *et al.*, 2017).

Padilha Júnior *et al.* (2015) expõem duas maneiras na qual o concreto pode sofrer ataque por sulfatos: origem interna e externa.

O ataque por sulfatos de origem interna ocorre quando um agregado é contaminado com gipsita ou quando um cimento com alto teor de sulfato é utilizado na fabricação do concreto (MEHTA; MONTEIRO, 2014).

Os sulfatos de origem externa são originários de solos contaminados e águas agressivas. Geralmente são sulfatos de sódio, potássio, magnésio e cálcio que reagem com os sulfatos da

massa de concreto e produzem etringita, causando expansão e posterior fissuração (NEVILLE; BROOKS, 2013).

Os produtos de hidratação do cimento Portland mais suscetíveis ao ataque externo são o hidróxido de cálcio e os compostos hidratados que contém alumina. Ao utilizar materiais com características ligantes, que reduzem as quantidades desses compostos, adquire-se maior resistência a esse tipo de ataque. Diferentes materiais podem ser adicionados para aumentar essa resistência, entre eles a cinza volante (HOPPE FILHO *et al.*, 2015).

Neville e Brooks (2013) afirmam que, dessa forma, torna-se interessante a utilização de cimento Portland com baixo teor de aluminato tricálcico, resistente a sulfatos ou ainda cimentos compostos com escória ou pozolanas. Porém, a densidade do concreto e sua permeabilidade também são fatores importantes para a durabilidade da massa frente ao ataque por sulfatos, pois a alta porosidade e permeabilidade favorecem a percolação de água e lixiviação do óxido de cálcio para a superfície do concreto. Na superfície, acontece a reação com o dióxido de carbono, formando carbonato de cálcio. Essas manchas esbranquiçadas também são chamadas de eflorescência.

2.6 CINZAS VOLANTES

A seguir, é abordado o tema de cinza volante, trazendo sua definição, forma de obtenção, classificação, composição e influência nas propriedades dos concretos.

2.6.1 Definição e obtenção

A NBR 12653 define cinzas volantes como: “resíduos finamente divididos que resultam da combustão de carvão mineral pulverizado ou granulado com atividade pozolânica” (ABNT, 2014b, p.2).

Mehta e Monteiro (2014) relacionam a produção de cinzas com a geração de energia elétrica em usinas termelétricas, onde o carvão pulverizado passa pela zona de queima, a elevadas temperaturas, queimando o carbono e os materiais voláteis, enquanto ocorre a fusão das impurezas, tais como a argila, o feldspato e o quartzo. Essa matéria fundida se solidifica na forma de partículas esféricas vítreas, e é movida para zonas com temperaturas mais baixas. Grande parte desse material é transportada pelo exaustor de gás e é capturada por precipitadores eletrostáticos.

A parte capturada por precipitadores eletrostáticos, representa cerca de três quartos do total produzido por caldeiras, que são as cinzas volantes. As demais cinzas, que são mais densas e permanecem no fundo da caldeira são chamadas de cinzas pesadas (FUNGARO; SILVA, 2002).

Recena (2011) afirma que as cinzas volantes têm como principal componente a sílica, além do carbono, mesmo que em pequenas quantidades. Complementando, Cezar (2011) apresenta além da sílica, a presença de alumina na composição das cinzas. A quantidade desses componentes presentes nas cinzas é usada como parâmetro para a sua classificação.

2.6.2 Classificação e composição

Segundo a ASTM C 618 (2005), as cinzas volantes são classificadas de acordo com a sua composição e em duas classes distintas: classe C e classe F. Quando a soma dos teores dos compostos de silicato, alumina, óxido de ferro e de cálcio for maior que 50 %, elas são classificadas como classe C. Quando os teores ultrapassam os 70 %, elas são classificadas como classe F.

As cinzas volantes categorizadas na classe F são originárias da queima de carvão betuminoso e, por isso, possuem baixo teor de cálcio e consequentemente não têm propriedades cimentantes. As cinzas classificadas na classe C, originárias da queima de carvão sub-betuminoso por possuírem grandes quantidades de CaO, apresentam propriedades cimentantes na presença de água (CEZAR, 2011).

2.6.3 Características físicas e químicas

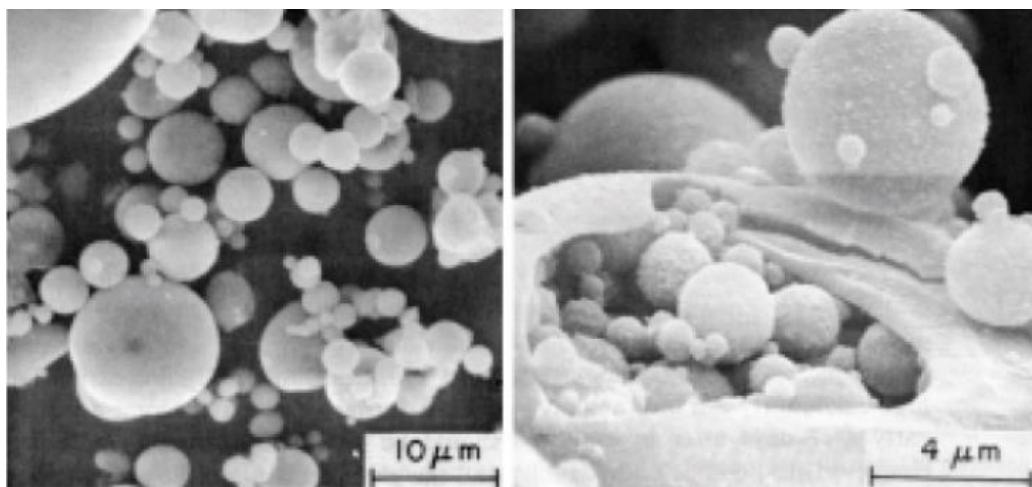
As propriedades físicas e químicas das cinzas volantes variam consideravelmente de uma usina termelétrica para outra por haver grande variedade química entre os carvões e as jazidas. Cinzas com altos níveis de carbono são resultado de perdas no processo de ignição e dos resultados incompletos dos processos de combustão. Estudos mostram, porém, que a qualidade das cinzas tem melhorado progressivamente com o passar dos anos (MEYER, 2009; RECENA, 2011).

2.6.3.1 Características físicas

As cinzas volantes, por serem resultado da parte inorgânica do carvão, remanescentes do processo de combustão entre as temperaturas de 1200°C e 1700°C, são compostas por minerais não combustíveis (AHMARUZZAMAN, 2010).

As partículas de cinzas volantes apresentam morfologia esférica (ARGIZ; MENÉNDEZ; SANJUAN, 2013), que pode se apresentar de forma sólida ou oca. Neste último caso, podem ser chamadas, ainda, de cenosferas (quando completamente vazias internamente) ou plerosferas (completa de numerosas esferas reduzidas) (MEHTA; MONTEIRO, 2014). Além disso, o material é formado por uma combinação de fases amorfas e cristalinas (XIE; XI, 2001). A Figura 3 apresenta a morfologia esférica das partículas de cinza volante.

Figura 3 - Micrografia da cinza volante



Fonte: Mehta; Monteiro (2014).

O material possui elevada finura e as partículas podem variar entre menos que 1 μm até partículas com 100 μm de diâmetro (CEZAR, 2011). Porém, a maior parte dessas partículas, cerca de 50 %, é inferior a 20 μm (ISAIA, 2007). Essa variação de tamanho ocorre devido ao grau de pulverização do carvão, do tipo de filtro instalado na usina e o processo térmico envolvido (FERNÁNDEZ-JIMÉNEZ; PALOMO, 2003). É interessante, também, que as partículas tenham o mesmo tamanho das partículas de cimento Portland (CESARI, 2015). A tonalidade das cinzas volantes também pode variar entre cinza e preto, dependendo do teor de carbono não queimado presente (AHMARUZZAMAN, 2010).

As fases predominantes na mineralogia das cinzas volantes são o quartzo, a caulinita, a ilita e a siderita. Os principais constituintes cristalinos presentes nas cinzas são o quartzo e a mulita (AHMARUZZAMAN, 2010).

Sabedot *et al.* (2011) apresentam a caracterização física e mineralógica das cinzas provenientes de usinas termelétricas do sul do país, onde a massa específica das mesmas variou entre 2,17 a 2,18 g/cm³. Além de se demonstrar um material alcalino, com variações de pH entre 9,6 e 12,6. A massa específica das cinzas volantes, apesar de variável, foi mencionada por Tutikian e Dal Molin (2011), em um valor próximo de 1,92 kg/dm³.

Cesari (2015) relaciona as propriedades físicas das cinzas volantes de sua pesquisa, originárias da Usina de Jorge Lacerda (SC), às encontradas em outros estudos. A massa específica encontrada em seu estudo foi de 2,36 g/cm³ e o diâmetro médio das partículas de cinza volante foi de 25,66 µm.

2.6.3.2 Características químicas

Assim como as propriedades físicas, as propriedades químicas das cinzas volantes podem ser influenciadas por diversos fatores, tais como o tipo de carvão e as técnicas escolhidas para o armazenamento e manuseamento, entre outros (AHMARUZZAMAN, 2010).

Os principais componentes das cinzas volantes são a sílica, a alumina, o óxido de ferro e de cálcio, além do carbono. Este último é medido pela perda de ignição (AHMARUZZAMAN, 2010). Recena (2011) afirma que o componente em maior concentração nas cinzas volantes sempre será a sílica, porém também sempre haverá a presença de carbono, em pequenas quantidades.

Diversas pesquisas mostraram a composição química do material e a relacionaram com as suas propriedades. É o caso de Soares *et al.* (2016) que ao executar a caracterização química do material classe F, puderam constatar a presença majoritária de 48,81 % de sílica e 21,77 % de alumina, além de outros elementos em menor quantidade, tais como o sódio, cálcio, o ferro, entre outros. Chousidis *et al.* (2016) puderam constatar a presença de 37,02 % de sílica e 16,8 % de alumina, entre outros componentes. Cesari (2015) utilizou cinzas com 64,1 % de SiO₂ e 22,9 % de Al₂O₃, entre outros elementos presentes.

Pandey e Bhattacharya (2016) estudaram a composição química das cinzas volantes, relacionando os elementos presentes em maior teor de concentração, tais como o alumínio e o

silício, com os elementos presentes em concentrações pequenas porém tóxicas, tais como os metais pesados.

Os metais pesados e a sua lixiviação foram estudados por Sushil e Batra (2006), que constataram a presença de alguns elementos, como Cr, Mn, Pb, Zn, Cu, Ni e Co. Dentre eles, os elementos encontrados com concentrações mais elevadas foram o Cr e Zn, já o elemento em menor concentração foi o Co. Além disso, discutiram a contaminação do solo e de lençóis freáticos, por meio desses elementos.

2.6.4 O emprego de cinzas volantes

As cinzas podem ser utilizadas na construção civil na produção de cimento Portland, na produção de concreto *in loco* tanto como ligante quanto como agregado e, ainda, como material de enchimento na estabilização de solos (VIANCHÁ; ROLDAN, 2007). Além dessas aplicações, há, ainda, a utilização de cinzas na produção de clínquer, na estabilização de resíduos, como material de enchimento em concretos asfálticos e utilização na área agrícola (MODESTO *et al.*, 2014).

2.6.4.1 Influência do emprego de cinzas volantes em concreto

A adição de cinzas volantes em concreto afeta o seu desempenho, tanto no estado fresco como no estado endurecido, alterando suas características mecânicas e sua durabilidade (SUÁ- IAM; MAKUL, 2015). Conforme apresentado a seguir.

2.6.4.1.1 Influência na microestrutura e na hidratação de matrizes cimentícias

A incorporação da cinza volante em concretos influencia diretamente o processo de hidratação e, consequentemente, a microestrutura do material. A diferença ocorre no processo de hidratação do ligante. O cimento Portland hidrata-se formando hidróxido de cálcio. Ao contrário da cinza volante, que ao hidratar-se consome hidróxido de cálcio. Além disso, a interação desses componentes com a sílica, alumina e ferro vítreos resulta na formação de compostos hidratados similares aos formados pela interação do hidróxido de cálcio com o cimento Portland (HOPPE FILHO, 2008; FU *et al.*, 2002).

Quando o hidróxido de cálcio e a cinza volante são misturadas em água, ocorre a rápida dissociação iônica do hidróxido de cálcio provendo íons de cálcio e hidroxila para a solução. Após, os íons de cálcio são rapidamente adsorvidos pela superfície das partículas de cinza volante (MASSAZZA, 1998).

Então, as hidroxilas atacam a matriz vítreia, destruindo as ligações entre o oxigênio e o alumínio ou a sílica, além de liberar íons alcalinos de potássio e sódio (BERRY *et al.*, 1994; FU *et al.*, 2002; MALEK *et al.*, 2005). O consumo de cálcio necessita da solubilização do hidróxido de cálcio para manutenção da saturação da solução. O primeiro produto a ser formado é o C-S-H. Os íons de alumínio formam aluminato tricálcico hidratado, que posteriormente se converterá em hidrogranada e katoita (MALEK *et al.*, 2005).

Inicialmente, a cinza volante atua como um material inerte, e tem um efeito retardador sobre a hidratação no sistema, principalmente nas primeiras 24 horas. Isso ocorre, pois, a cinza necessita que sua fração vítreia se solubilize para interagir com o hidróxido de cálcio. A atividade pozolânica do concreto com cinza volante passa a ser significativo, geralmente após 28 dias de idade. O crescimento dos hidratos acontece, além da superfície do cimento, na superfície das partículas de cinza volante. Ocorrendo, assim, nucleação heterogênea, além do aumento do grau de hidratação em 16%, compensando o menor grau de hidratação do início da cura. (HANEHARA *et al.*, 2001; HOPPE FILHO, 2008).

A taxa de reação da interação entre o hidróxido de cálcio e a cinza volante é influenciada por alguns fatores (HOPPE FILHO, 2008). A temperatura atua como combustível na aceleração do consumo de hidróxido de cálcio e, como consequência, no aumento do consumo de água, resultado em maiores quantidades de hidratos (KOBAYAKAWA *et al.*, 2003). Já a relação hidróxido de cálcio/cinza volante influencia na solubilização das partículas de cinza (BIERNACKI; WILLIAMS; STUTZMAN, 2001), assim como o pH da solução, que deve ter um valor mínimo de 13,2 para uma dissolução significativa (BROUWERS; VAN EIJK, 2003). Além disso, a reatividade, que também influencia a taxa de reação, é determinada pelo teor de fase vítreia da pozolana e do óxido de cálcio (UCHIKAWA, 1986).

Ao se substituir cimento Portland por cinza volante em concretos, está se reduzindo a liberação de calor no mesmo período de hidratação. Ao considerar somente o calor referente ao teor de cimento, porém, verifica-se que ele é maior. Isto ocorre pois o grau de hidratação do cimento aumenta devido a diluição do cimento, independente do teor da pozolana no material (WCZELIK, 2001).

A porosidade do concreto praticamente não se altera com a alteração da reação entre os componentes. Nas primeiras idades, a porosidade do concreto pozolânico é maior que a do concreto convencional, porém a distribuição dos poros é alterada. Além disso, a interação entre o hidróxido de cálcio e a cinza volante altera a porosidade do concreto com o refinamento por meio da redução do diâmetro médio dos poros (HOPPE FILLHO, 2008; MASSAZZA, 1998; WANG; ZHANG; SUN, 2004).

Hoppe Filho (2008) apresenta em sua pesquisa as características de hidratação do cimento e os efeitos da presença da cinza volante, conforme é apresentado no quadro 4.

Quadro 4 - Influência da cinza volante no processo de hidratação do cimento

Período	Efeito
Pré-indução (10 minutos)	Não altera o calor de molhagem; Adsorção superficial de íons de cálcio; Causa: carga superficial da pozolana. Consequência: consome íons da solução. Menor precipitação de C-S-H; Menor precipitação de etringita; Maior dissolução das fases anidras. Causa: menor concentração de cálcio.
Indução (2 horas)	Diminui a taxa de hidratação; Adsorção superficial de íons de cálcio; Causa: carga superficial da pozolana. Consequência: consome íons da solução. Menor precipitação de C-S-H; Menor precipitação de etringita; Causa: menor concentração de cálcio.
Aceleração (10 a 15 horas)	Aumento o tempo do período; Causa: nucleação heterogênea. Aumenta os tempos de pega; Reduz a taxa de hidratação inicial; Causa: menor concentração de cálcio. Aumenta a taxa de hidratação final; Causa: nucleação heterogênea. Menor intervalo entre os tempos de pega.
Desaceleração (10 a 15 horas)	Diminui o tempo do período; Aumenta a taxa de hidratação; Causa: nucleação heterogênea. Maior precipitação de C-S-H; Maior precipitação de portlandita.

Fonte: Hoppe Filho (2008).

2.6.4.1.2 Influência nas propriedades do concreto a fresco

O estado fresco do concreto pode ser definido como um fluido com tensão de escoamento e viscosidade plástica, composto pela pasta de cimento, com partículas do material e produtos de hidratação formados e dispersos em água, além dos agregados de areia e brita dispersos na mesma pasta. Todos esses elementos sofrem interação uns com os outros (PICHLER; RÖCK; LACKNER, 2017; ROUSSEL *et al.*, 2010; KOVLER; ROUSSEL, 2011).

A inclusão de cinzas volantes na mistura de concreto acarretará em mudanças em seu estado fresco. É possível afirmar que as cinzas podem proporcionar maior plasticidade à mistura (REIS, 2009). Güneyisi *et al.* (2015) afirma que as cinzas volantes são o principal fator de aumento da fluidez em concretos. Tal fato ocorre devido a alguns fatores, tais como a maior densidade do material em comparação ao cimento Portland, conferindo um efeito de enchimento a massa e também pelo fato da formação tardia dos elementos de hidratação em idades precoces (HEMALATHA; RAMASWAMY, 2017).

Essas alterações são resultado do formato esférico das partículas de cinza volante, que por isso, lhe conferem maior movimento de partículas e de rolamento entre elas (HEMALATHA; RAMASWAMY, 2017). Além disso, a utilização de cinzas volantes pode ser considerada vantajosa, pois reduz a demanda por cimento na mistura e elimina a necessidade da utilização de aditivos químicos, que seriam utilizados para o aumento da plasticidade (KASHANI *et al.*, 2014).

Reis (2009) afirma que a utilização de cinzas volantes no concreto também diminui a segregação e a exsudação do material. Esses fenômenos são definidos por Mehta e Monteiro (2014, p. 398) como: “a separação dos componentes de uma mistura de concreto fresco de tal forma que a sua distribuição deixe de ser uniforme”. E, ainda, “fenômeno cuja manifestação externa é o surgimento de água na superfície após o concreto ter sido lançado e adensado, porém antes de sua pega”, respectivamente.

Tais fenômenos podem ocorrer devido à entrada de energias de vibração, que ocasionam o acúmulo de componentes leves sobre a camada de concreto (PANESAR; SHINDMAN, 2012). Com a incorporação de cinzas volantes na massa, esse processo é dificultado pela retenção da água e pela coesão da mistura proporcionada pela pozolana (RECENA, 2011).

O baixo calor de hidratação proporcionado pela incorporação das cinzas volantes no concreto é resultado da inatividade da cinza durante algum tempo após o início da mistura. Ela só inicia seu processo de reação após a reação do cimento e a formação de hidróxido de cálcio na pasta, que então, vai reagir com as cinzas para dar maior resistência à mistura (ALAKA; OYEDELE, 2016). O baixo calor de hidratação influencia diretamente nas características do concreto endurecido, como tratado no tópico subsequente.

2.6.4.1.3 Influência nas propriedades do concreto endurecido

Durante o processo de endurecimento da mistura de concreto, a cinza volante contribui para a diminuição da temperatura da massa. Tal fato ocorre devido às reações de hidratação mais lentas. É percebido, também, que ocorre o refinamento dos poros da pasta, e ganho de resistência mais tardio, aproximadamente aos 28 dias (CEZAR, 2011).

Além de diminuir o calor de hidratação, as reações mais lentas propiciam menor fissuração em idades precoces (PULIDO; LIZARAZO-MARRIAGA; CHAPARRO, 2015; KANNAN; GANESAN, 2014).

Fonseca (2010) afirma que as cinzas volantes não apresentam interações químicas significativas com os produtos de hidratação do cimento durante os sete primeiros dias. É após esse período que o processo se inicia.

Entretanto, a reação de hidratação e as taxas de endurecimento mais lentas impõem ao concreto maior sensibilidade às condições de cura, especialmente em climas frios (AHMARUZZAMAN, 2010).

Apesar da resistência do material em curto prazo ser pequena (MEYER, 2009), é possível ter resistências semelhantes ou até superiores às do concreto convencional, em idades avançadas (REIS, 2009).

Recena (2011) explica que esse fenômeno ocorre pelo fato de as partículas de cinzas reagirem de forma diferente com o hidróxido de cálcio, formando outros produtos de hidratação, que acabam propiciando resistência extra ao material.

Esse fenômeno é complementado por Cezar (2011) que reafirma a importância da finura das partículas de cinza, exercendo papel importante na progressão da resistência a compressão do concreto, pois, por meio das partículas pequenas desenvolve-se um efeito microfiller de reforço nos produtos de hidratação. Além disso, Fernández-Jimenez e Palomo (2003) concluíram que 80 % das partículas das cinzas volantes utilizadas devem ter tamanho inferior a 45 µm.

Durante o processo de endurecimento do concreto, a velocidade com que ocorrem as reações com o hidróxido de cálcio é rápida. A partícula da pozolana é sondada de fora para dentro, recebendo inúmeros produtos de reação, que protegem o núcleo da partícula, dificultando a difusão (DJANIKIAN, 1981). Dessa forma, trata-se de uma reação de superfície, na qual o tamanho das partículas e a finura do material têm fundamental importância no desempenho da reação (RECENA, 2011).

A utilização da cinza é viável também quando a resistência inicial não for o fator mais importante do processo (RECENA, 2011), tornando-se, assim, uma alternativa econômica e útil para melhorar as propriedades e o desempenho do material, tanto no estado fresco como no estado endurecido (PULIDO; LIZARAZO-MARRIAGA; CHAPARRO, 2015).

2.7 PROJETO FATORIAL E OTIMIZAÇÃO NUMÉRICA COMPUTACIONAL

Dos diversos tipos de abordagens estatísticas, o projeto fatorial é utilizado quando se deseja investigar o efeito de diversas variáveis. São estudadas as influências de cada variável em cada réplica de execução do experimento (BUTTON, 2005). Além disso, o projeto fatorial pode ser completo ou fracionado.

Nos projetos fatoriais completos utiliza-se a nomenclatura (N^k), sendo N níveis para K fatores. Os projetos fatoriais fracionados usa-se a nomenclatura (N^{k-p}), sendo N níveis para K fatores e p grau de fracionamento (BUTTON, 2005).

O projeto fatorial fracionado permite o planejamento e a realização de maneira organizada de uma quantidade mínima necessária de experimentos, com economia de tempo e recursos financeiros (SILVA *et al.*, 2006; BARROS NETO; SCARMINIO; BRUNS, 2010).

Os resultados analisados em projetos fatoriais podem ser apresentados em gráficos de superfície de resposta, que são definidos como um grupo de técnicas que visam estudar as relações entre as variáveis controláveis e as respostas desejadas. Além disso, a aplicação desses gráficos para experimentos em engenharia é recente, destacando-se estudos de otimização de propriedades (POSSAN; VENQUIARUTTO; DAL MOLIN, 2011; MONTGOMERY, 1991).

A utilização simultânea de projetos fatoriais, gráficos de superfície de resposta e otimização numérica computacional são benéficos quando se almeja a fabricação de determinados produtos com propriedades pré-estabelecidas (CORNELL, 2002).

CAPÍTULO 3 - MATERIAIS E MÉTODOS

Nesse capítulo será apresentado os materiais utilizados na pesquisa, juntamente com o procedimento experimental.

3.1 MATERIAIS

3.1.1. Agregados

Os agregados graúdos e miúdos utilizados foram a brita tamanho 0 e a areia média, ambos extraídos da região nordeste do estado de Santa Catarina.

3.1.2 Cimento Portland

O cimento Portland utilizado foi da marca VOTORAN do tipo CP II-Z 32, por possuir maior versatilidade de utilização e ser facilmente encontrado em lojas da região, composto de 6 a 14% de pozolana e até 10% de material carbonático.

3.1.3 Cinza volante

A cinza volante utilizada é originária da Usina Termelétrica Jorge Lacerda, da cidade de Capivari de Baixo, sul do estado de Santa Catarina. Uma amostra de 100 kg foi fornecida pela empresa Engie Energia. A Figura 4 mostra parte da amostra recebida.

Figura 4 - Amostra da cinza volante utilizada na pesquisa



Fonte: o autor.

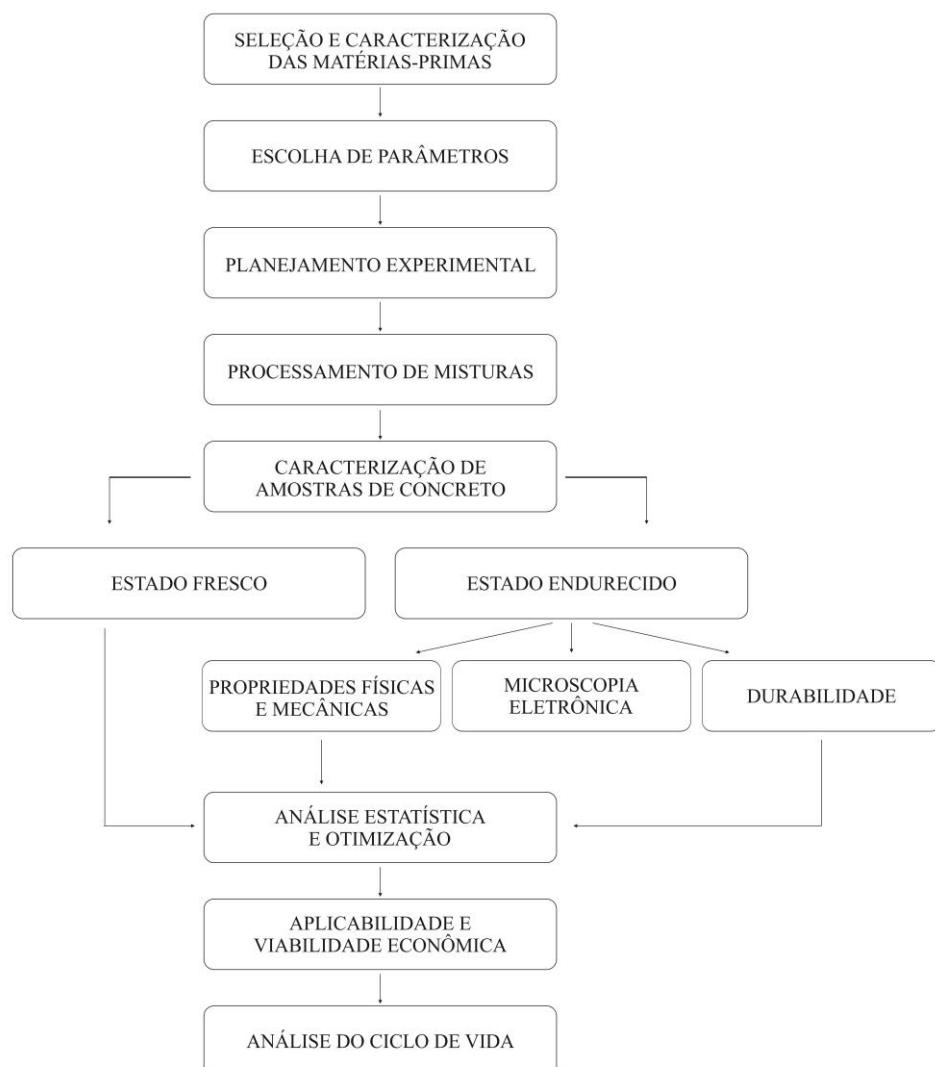
3.1.4 Água

No presente estudo, a água utilizada foi proveniente da rede de abastecimento público de água da cidade de Joinville/SC (Águas de Joinville).

3.2 PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

A Figura 5 apresenta um resumo geral do procedimento experimental utilizado na presente pesquisa.

Figura 5 - Fluxograma resumido do procedimento experimental.



Fonte: o autor.

3.2.1 Seleção e caracterização de matérias-primas

3.2.1.1 Agregado miúdo e graúdo

O agregado miúdo foi caracterizado por meio de um ensaio de distribuição granulométrica e determinação do módulo de finura, dimensão máxima e massa específica por meio da NBR NM 248 (ABNT, 2003).

O agregado graúdo passou por um ensaio de distribuição granulométrica, módulo de finura, dimensão máxima e massa específica por meio da NBR NM 248 (ABNT, 2003).

3.2.1.2 Cinza volante

A amostra foi primeiramente moída a seco em um moinho de bolas Servitech CT-241, por um período de 15 minutos. Uma amostra foi submetida ao ensaio de distribuição granulométrica por meio da técnica de difração a laser, no laboratório do CTCmat - Centro de Tecnologia em Materiais (SENAI/Criciúma, SC).

A análise química foi obtida por fluorescência de raios X (FRX), em equipamento Shimadzu XRD do laboratório do CTCmat - Centro de Tecnologia em Materiais (SENAI/Criciúma, SC)

Para medir o índice de atividade pozolânica, foram preparados seis corpos de prova de argamassas com dois traços distintos, três para cada mistura, segundo NBR 5752 (ABNT, 1992b). A argamassa A conteve somente cimento Portland (CP II-F), areia - NBR 7214 (ABNT, 2015b) e água. A argamassa B conteve substituição de 35% do cimento Portland por cinza volante. O índice de atividade pozolânica foi calculado por meio da proporção da resistência média à compressão das misturas, aos 28 dias de idade.

3.2.2 Escolha de parâmetros

Com base na literatura, foi realizado um estudo preliminar para obtenção de valores de relação água/ligante (W/C), agregado/ligante (A/C) e taxa de substituição de cinza volante por cimento Portland (TC).

Com base no estudo de Buest, Silva e Campitelli (2005), foram adotados parâmetros para um concreto com resistência a compressão de dosagem (fck) após 28 dias de cura de 30

MPa e para uma trabalhabilidade de 100 mm, permitindo-se uma variação de 20 mm para mais ou para menos.

Kannan e Ganessan (2014), Ahmaruzzaman (2010), Siqueira, Souza e Souza (2012) e Cezar (2011), apesar de não utilizarem técnicas de delineamento de experimentos, afirmaram que o teor de substituição ideal de cinza volante por cimento Portland (CP) é de 30%. Entretanto, é de conhecimento que os parâmetros W/C e A/C afetam a matriz cimentícia, alterando o valor otimizado de TC. Dessa forma, com base nos estudos preliminares e visando a avaliar as interações dos parâmetros com os teores de TC, foram adotados os teores de 10%, 20% e 30% de cinza volante (em massa) nesta pesquisa.

A mistura padrão foi delineada para W/C igual a 0,33 e A/C de 3,10, contendo apenas CP. Para as demais misturas, ficaram estipulados os seguintes limites (levando em conta a trabalhabilidade):

Tabela 3 - Proporções do projeto fatorial.

Fator	Níveis		
	Menor	Médio	Maior
W/C	0,28	0,33	0,40
A/C	2,70	3,10	3,60
TC (%)	10	20	30

Fonte: o autor.

3.2.3 Planejamento experimental

Foi utilizado um projeto fatorial fracionado 3^{3-1} , para o planejamento experimental. Utilizou-se o *software* Statistica 8.0 (STATSOFT, INC., 2007) para a obtenção de 9 (nove) misturas diferentes, delineadas aleatoriamente, Tabela 4. A ordem de realização de misturas foi determinada pelo *software*, a fim de buscar a diminuição de erros de execução.

Tabela 4 - Misturas do projeto fatorial

Misturas	W/C	A/C	TC (%)	Misturas	W/C	A/C	TC (%)
Padrão	0,33	3,10	0	5	0,33	3,10	20
1	0,28	2,70	10	6	0,33	3,60	10
2	0,28	3,10	30	7	0,40	2,70	20
3	0,28	3,60	20	8	0,40	3,10	10
4	0,33	2,70	30	9	0,40	3,60	30

Fonte: o autor.

A Tabela 5 representa a quantidade do material para a confecção de 1 m³ de cada mistura de concreto.

Tabela 5 - Quantidade de material para cada tipo de mistura do projeto fatorial

	Água (Kg)	Agregado miúdo (Kg)	Agregado graúdo (Kg)	Cinza volante (Kg)	Cimento Portland (Kg)
Padrão	175,62	681,25	957,50	0	529,37
1	148,75	583,75	845,63	53,125	476,25
2	148,75	681,25	957,50	158,75	370,625
3	148,75	792,50	1113,75	105,625	423,75
4	175,62	583,75	845,63	158,75	370,625
5	175,62	681,25	957,50	105,625	423,75
6	175,62	792,50	1113,75	53,125	476,25
7	211,88	583,75	845,63	105,625	423,75
8	211,88	681,25	957,50	53,125	476,25
9	211,88	792,50	1113,75	158,75	370,625

Fonte: o autor.

3.2.4 Processamento de misturas e obtenção de amostras para ensaios

As misturas de concreto foram elaboradas em conformidade com a NBR 12655 (ABNT, 2015c). A betoneira utilizada na pesquisa foi da marca Menegotti, com capacidade para 120 litros, que foi primeiramente umedecida. Após o umedecimento, foi adicionado 1/3 da água da mistura, em seguida o agregado graúdo, o cimento Portland, o agregado miúdo, 2/3 da água e a cinza volante, nessa ordem.

Então, foi realizada a moldagem dos corpos de prova, de acordo com a NBR 5738 (ABNT, 2016). Foram utilizados moldes cilíndricos metálicos (20 cm x 10 cm) e também moldes metálicos cúbicos (6 cm x 6 cm x 2 cm), para o ensaio de abrasão superficial. Os moldes foram preenchidos com concreto até a metade, então receberam 12 golpes com um bastão para seu melhor adensamento, e depois foram preenchidos até o topo, repetindo o procedimento a fim de melhorar o seu adensamento e retirar possíveis bolhas de ar da massa. Os concretos permaneceram nesses moldes por um período de 24 horas.

Os corpos de prova foram desmoldados e colocados em um tanque, sob cura úmida, a 25°C. Permanecendo por 28 dias ou até a sua utilização para os ensaios, conforme Figura 6.

Figura 6 - Corpos de prova em cura úmida.



Fonte: o autor.

3.2.5 Caracterização de amostras de concretos

A caracterização dos concretos foi realizada de acordo com a Figura 7.

Figura 7 - Fluxograma resumido da caracterização dos concretos.



Fonte: o autor.

3.2.5.1 Caracterização do concreto fresco

Foram realizados ensaios de índice de consistência e calorimetria, conforme apresentado a seguir:

a. Índice de Consistência (IC)

Após a mistura dos elementos na betoneira, foi realizado o ensaio do teste do abatimento do cone (*slump test*), a fim de mensurar o índice de consistência do concreto. A metodologia adotada está de acordo com os procedimentos da NBR NM 67 (ABNT, 1998). O molde em formato de cone foi preenchido em três etapas. No final de cada etapa foram executados 25 golpes com um bastão metálico. No final, o cone metálico foi retirado em um tempo aproximado de 10 segundos. O resultado foi obtido pela medida de recalque da massa de concreto, em relação a altura total do cone.

b. Avaliação do calor gerado durante a cura como uma função do tempo (Calorimetria)

O ensaio de calorimetria foi realizado em um calorímetro semi-adiabático, no qual o fluxo de calor foi medido por meio de monitoramento na amostra, enquanto ela permanecia em uma condição de isolamento térmico, com perda mínima de calor para o ambiente.

Esse ensaio foi realizado no laboratório de Materiais de Construção da UDESC. Uma amostra de aproximadamente 500 gramas de concreto foi separada e retirada imediatamente após a finalização da mistura dos elementos da betoneira para a execução do ensaio. Foi utilizado calorímetro com o auxílio do Software ImpacLog 1.0 (SMARTTECH, 2010) para a coleta de dados.

3.2.5.2 Caracterização do concreto endurecido – propriedades físicas e mecânicas

Foram realizados ensaios de resistência à compressão e absorção de água, conforme apresentado a seguir.

a. Resistência à compressão (RC)

A resistência à compressão dos concretos foi mensurada nas idades de 28 e 60 dias. A idade de 60 dias foi escolhida, por que foram encontrados poucos estudos que se aprofundaram na resistência mecânica desse tipo de concreto em idades longas. O equipamento utilizado foi

uma prensa hidráulica elétrica, conectada a um computador, modelo Emic PC200I, instalada no Laboratório de Materiais de Construção do CCT/UDESC.

b. Absorção de água (AA)

O ensaio de absorção de água foi realizado de acordo com a NBR 9778 (ABNT, 2005). Foram ensaiados dois corpos de prova de cada mistura confeccionada. As amostras foram secas em estufa por 72 horas a 105 °C e, após esse processo, foram pesadas (m_s). Depois disso, elas foram imersas em água por 72 horas e colocadas em um recipiente exposto ao fogo, entrando em ebulação depois de 15 a 30 minutos de imersos. Ficaram em fervura por 5 horas esfriaram naturalmente até 23°C e, então, foram pesadas novamente, em uma balança hidrostática (m_{sat}). O resultado foi a média das duas determinações realizadas para tipo de concreto. A absorção de água foi calculada de acordo com a equação 1.

$$\frac{M_{sat} - M_s}{M_s} \times 100 \quad (1)$$

3.2.5.3 Caracterização do concreto endurecido - microscopia eletrônica de varredura (MEV).

Para a obtenção das micrografias, foi utilizado um microscópio eletrônico de varredura JEOL JSM 6400, associado a um espectrômetro de energia dispersiva – EDS, do laboratório de microscopia ótica da UDESC.

As amostras, consistidas de pequenos fragmentos, foram retiradas de corpos de prova das misturas de concreto, após o rompimento no ensaio de resistência a compressão de 28 dias. O fragmento foi levado a uma estufa, a uma temperatura de $105 \pm 5^\circ\text{C}$ por cerca de 24 horas para sua completa secagem. Em seguida a amostra foi embutida em resina epóxi por cerca de 24h até completo endurecimento da mesma.

Após esse procedimento, as amostras foram levadas ao laboratório de metalografia da UDESC e então lixadas por uma sequência de lixas de carboneto de silício por 1 hora e, depois, polidas em uma politriz motorizada durante uma hora, também. Para a análise, as amostras foram cobertas por camada metalizada de ouro e então levadas para análise microscópica.

3.2.5.4 Caracterização do concreto endurecido - durabilidade das misturas de concreto

Foram realizados ensaios de resistência ao ataque de sulfato e abrasão superficial, conforme apresentado a seguir:

a. Resistência ao ataque de sulfato (RSUL)

A metodologia para avaliar a penetração de sulfatos em concreto foi baseada nos trabalhos de Rodrigues (2004) e Schackow (2015) e na norma norte-americana ASTM C 1012 (2015). Os corpos de prova de duas misturas do estudo (4 e padrão) foram secos em uma estufa a 60 °C, pesados e, então, mergulhados em uma solução de sulfato de sódio, com pH 10 por 2 h. Após a imersão, foram colocados na estufa a 90 °C por um período de 21,5 h, esfriamento por 30 min e então pesagem do material. Cada ciclo com duração de 24 horas, foi repetido por 30 dias. O resultado foi obtido pela variação da absorção de água no início e no final da exposição aos 30 ciclos. As amostras foram escolhidas pelo fato de terem TC diferentes.

b. Resistência à abrasão superficial (RAB)

O ensaio de abrasão superficial foi desenvolvido pelo Centro de Ciência e Tecnologia do Rio Grande do Sul – CIENTEC (2016) e trata de uma metodologia para a simulação do desgaste por abrasão, consistindo na simulação de um percurso de 500 m percorridos por corpos de prova de 50 mm x 50 mm a uma pressão de 0,06 MPa. O material abrasivo utilizado foi o carbeto de silício e o resultado foi mensurado pela média do desgaste em cinco pontos do corpo de prova, em mm.

Esse método foi utilizado em trabalhos como o de Silva (2011). A Associação Brasileira de Normas Técnicas possui norma própria para a determinação do desgaste por abrasão pela NBR 12042 (ABNT, 2012), porém não há o equipamento necessário para a execução do ensaio na UDESC.

3.2.6 Análise estatística dos resultados e otimização numérica

A caracterização das misturas de concreto foi realizada por meio da análise estatística do *software* Statistica 8.0 (STATSOFT, INC., 2007). A partir da significância e adequação,

modelos de regressão foram obtidos para cada propriedade, como uma função dos fatores W/C, A/C e TC. Com base nos modelos obtidos, foi utilizada a técnica de metodologia de superfícies de resposta (MSR) para avaliar o efeito nas propriedades.

3.2.7 Aplicabilidade e viabilidade econômica dos concretos

Foi realizada uma análise econômica dos concretos com base em preços de mercado da região nordeste de Santa Catarina.

O cálculo do custo levou em consideração o transporte da cinza até a cidade de Joinville. O preço dos agregados miúdo e graúdo adotado foi o da tabela de referencial de preços do SINAPI (2017), o custo do cimento Portland foi o encontrado pelo mercado em Joinville. O valor da água foi baseado no valor da taxa mínima cobrada pela companhia Águas de Joinville. O custo das cinzas volantes foi baseado na literatura (ISAIA; GASTALDINI, 2009) e também no mercado.

A classificação segundo a aplicabilidade dos concretos obtidos será de acordo com as Tabelas 6 e 7, conforme NBR 8953 (2015).

Tabela 6 - Classificação de concreto para fins estruturais (RC28) - NBR 8953 (2015)

Classe	Grupo de resistência	Resistência característica à Compressão (MPa)	Classe	Grupo de resistência	Resistência característica à Compressão (MPa)
I	C10	10	II	C55	55
	C15	15		C60	60
	C20	20		C70	70
	C25	25		C80	80
	C30	30			
	C35	35			
	C40	40			
	C45	45			
	C50	50			

Fonte: ABNT (2015a) – adaptado

Tabela 7 - Classificação de concreto para fins estruturais (IC) - NBR 8953 (2015)

Classe	Abatimento (mm)	Aplicações típicas
S10	$10 < A < 50$	Concreto extrusado, vibroprensado ou centrifugado
S50	$50 < A < 100$	Alguns tipos de pavimentos e de elementos de fundações
S100	$100 < A < 160$	Elementos estruturais, com lançamento bombeado do concreto
S160	$160 < A < 220$	Elementos estruturais com lançamento bombeado do concreto
S220	> 220	Elementos estruturais esbeltos ou com alta densidade de armaduras

Fonte: ABNT (2015a) – adaptado

3.2.8 Caracterização ambiental do concreto – avaliação do ciclo de vida

Foram selecionadas as misturas, 1, 4 e padrão. As misturas foram escolhidas por apresentarem teores de cinza diferentes. A unidade funcional do estudo é uma tonelada de concreto produzida ficticiamente em uma obra próxima ao Centro de Ciências Tecnológicas CCT-UDESC, em Joinville-SC. O estudo envolve a avaliação do ciclo de vida dos materiais utilizados no concreto, bem como o seu transporte da sua extração até a sua disposição final.

Os agregados selecionados foram calculados para uma distância máxima de 50 km, da utilização até o uso (originária de Guaramirim). O cimento Portland utilizado teve uma distância entre sua produção e utilização de 200 km (Originária de Vidal Ramos). O período de vida útil do concreto final foi estimado em 50 anos, segundo estabelecido pela NBR 15575 (ABNT, 2013) e a distância entre a obra e o aterro industrial de disposição final foi estabelecida em 10 km (aterro industrial de Joinville).

A cinza volante, oriunda do processo de geração de energia elétrica, foi determinada como um resíduo industrial final, pois não se trata de um material produzido para tal finalidade, da produção de concreto. Nesse caso, para este estudo, considerou-se que o material teve impacto zero em sua produção, e, consequentemente, sem carga ambiental na inclusão do material para a produção de concreto.

Os dados dos materiais utilizados foram extraídos do *software* SimaPro (PRÉ SUSTAINABILITY, 2014), na qual foram adicionados dados referentes ao transporte do local de extração/produção até a utilização em obra, além do transporte da obra até o seu destino final. Os parâmetros avaliados foram o potencial de aquecimento global e a depleção de recursos abióticos naturais fósseis. Esses dois fatores foram escolhidos, entre os demais, para avaliação, pois diversos trabalhos mostraram a importância da análise dos mesmos, como o de Sombrio (2015) e Saade (2014).

CAPÍTULO 4 - RESULTADOS E DISCUSSÕES I: CARACTERIZAÇÃO DAS MATÉRIAS-PRIMAS

As características das matérias primas são fundamentais para a obtenção de concretos com propriedades específicas. Nesta etapa, as principais características físicas e químicas das matérias primas utilizadas para a obtenção de concretos (cimento Portland, cinza volante, agregado miúdo e agregado graúdo) foram avaliadas.

4.1 CIMENTO PORTLAND

A Tabela 8 mostra a composição mineralógica do cimento utilizado.

Tabela 8 - Teores dos componentes do CP II-Z de acordo com a NBR 11578 (1997).

Tipo de Cimento Portland	Classe de Resistência	Composição (% de massa)				Norma Brasileira
		Clínquer + Sulfato de cálcio	Escória Granulada de Alto Forno	Material Pozolânico	Material Carbonático	
CP II-Z	32	94 – 76	----	6 - 14	0 - 10	NBR 11578

Fonte: ABNT (1997) – adaptado.

Conforme exigências da NBR 11578, o cimento CPII-Z deve apresentar, em sua composição, quantidade entre 6 e 14% de pozolana, até 10% de material carbonático e entre 94 e 76% de clínquer e sulfato de cálcio. Dessa forma, pode ser aplicado em obras de construção civil para usos diversos, inclusive estruturais.

4.2 CINZA VOLANTE

4.2.1 Análise química

A composição química (em massa) da cinza volante está representada na Tabela 9. Os resultados mostram que a amostra de cinza volante utilizada atende à NBR 12653 (ABNT, 2014b) para apresentar atividade pozolânica. De acordo com a norma, a soma das quantidades de SiO_2 , Al_2O_3 , e Fe_2O_3 deve ser superior a 70 %, bem como a quantidade de SO_3 deve ser inferior a 5 %. A Tabela 9 mostra que os valores para a primeira exigência superam 90 % e inferior a 1,5 % no segundo caso.

Tabela 9 - Composição química da cinza volante

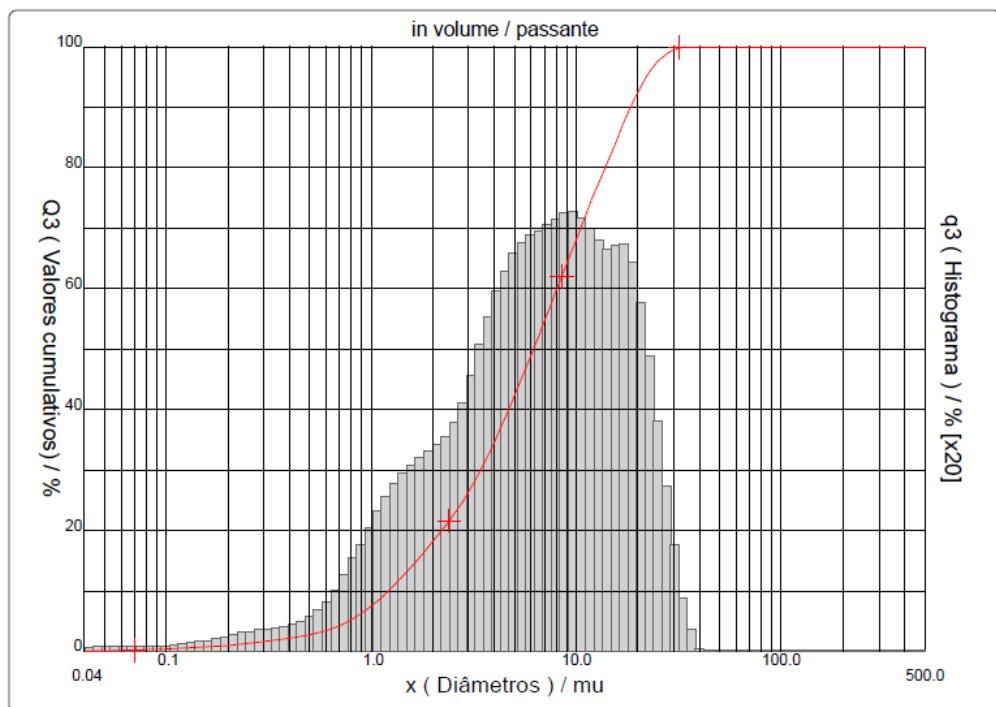
Elemento	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	K ₂ O	CaO	TiO ₂	SO ₃	P ₂ O ₅
Conteúdo (%)	51,25	31,87	7,08	3,99	2,05	1,56	1,49	0,70

Fonte: o autor.

4.2.2 Distribuição granulométrica

A Figura 8 apresenta a curva de distribuição granulométrica das partículas da cinza volante utilizada nesse estudo, na qual a granulometria do material representou 100 % das partículas menores que 36 µm. Além disso, 10% das partículas possuíram dimensão inferior a 1,21 µm, 50% das partículas possuíram dimensão inferior a 6,18 µm e 90% das partículas possuíram dimensão inferior a 18,44 µm, indicando uma elevada reatividade das partículas. Estudos realizados por Fernández-Jimenez e Palomo (2003) apontam que para o desenvolvimento de atividade pozolânica mínima, 80% das partículas de cinza volante devem possuir tamanho inferior a 45 µm. Dessa forma, a amostra utilizada é formada por material particulado adequado para uso como material pozolânico.

Figura 8 - Distribuição granulométrica das partículas de cinza volante



Fonte: o autor.

4.2.3 Atividade pozolânica

Por meio do ensaio de resistência à compressão, aos 28 dias de cura, foi possível a obtenção do índice de atividade pozolânica da cinza volante, utilizada no estudo. Os resultados do ensaio, juntamente com o traço das misturas estão apresentados na Tabela 10. A argamassa A possui apenas cimento Portland (CP II-F) em sua composição e a argamassa B possui teor substituição de cimento Portland por cinza volante de 35%.

Tabela 10 - Atividade pozolânica.

Tipo de argamassa	Cimento Portland (g)	Cinza volante (g)	Areia (g)	Água (g)	Resistência à compressão (MPa)
Argamassa A	624	-	1872	300	36,25±2,55
Argamassa B	486	156	1872	300	30,81±2,48

Fonte: o autor.

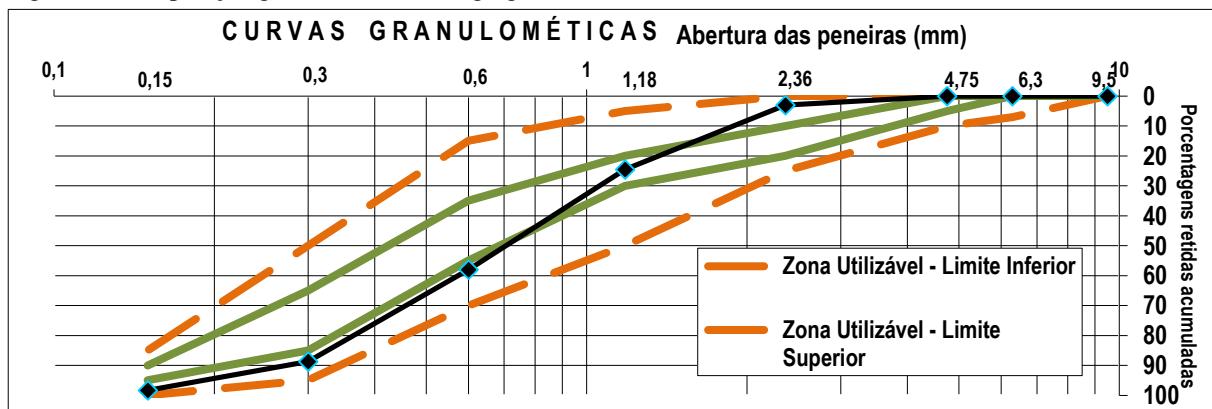
De acordo com os resultados da resistência à compressão, o índice de atividade pozolânica da cinza volante utilizada neste estudo foi de 84,96%. A NBR 12653 (ABNT, 2014b) estabelece que o índice mínimo para a atividade pozolânica seja de 75%.

Portanto, de acordo com os resultados obtidos para a amostra de cinza volante, esta apresenta características físicas e químicas que contribuem para seu uso como um material cimentício suplementar. Por outro lado, apresenta atividade pozolânica de cerca de 85 %, de modo que poderá contribuir com a obtenção de concretos com propriedades mecânicas adequadas para uso como material de construção.

4.3 AGREGADO MIÚDO

A Figura 9 apresenta o comportamento da distribuição granulométrica do agregado miúdo. A NBR 7211 (ABNT, 2009c) classifica os agregados miúdos em duas zonas principais, zona ótima e utilizável, conforme sua classificação granulométrica. A areia utilizada neste estudo está dentro da zona utilizável de trabalho. Além disso, o módulo de finura encontrado para a areia foi de 2,73 e a dimensão máxima característica foi de 2,36 mm. A massa específica foi de 2,50 g/cm³. Os valores encontrados estão de acordo com as exigências da NBR 7211(2009c).

Figura 9 - Composição granulométrica do agregado miúdo



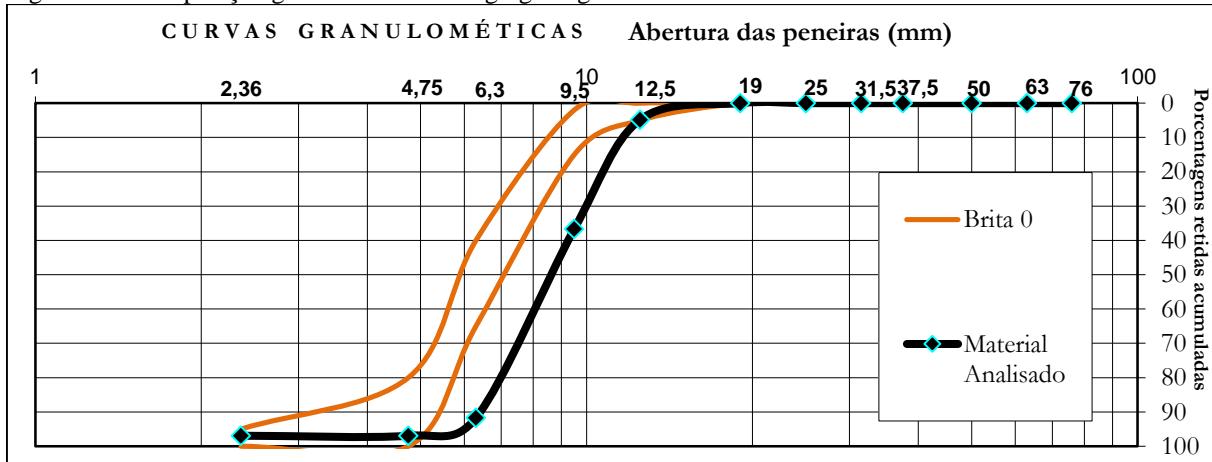
Fonte: o autor.

Os resultados das medidas mostram que a distribuição granulométrica e a finura do agregado miúdo atendem a norma NBR 7211 (ABNT, 2009c) e que o mesmo pode ser utilizado como agregado para a obtenção de concretos para construção.

4.4 AGREGADO GRAÚDO

A curva de distribuição granulométrica do agregado graúdo é representada na Figura 10.

Figura 10 - Composição granulométrica do agregado graúdo



Fonte: o autor.

De acordo com a Figura 10, a curva granulométrica mostra que o agregado corresponde a brita 0. Entretanto, essa variação não compromete seu uso como agregado graúdo na obtenção de concretos. Os resultados para o módulo de finura (6,18), a dimensão máxima (12,5 mm) e a massa específica ($2,71 \text{ g/cm}^3$) estão de acordo com às exigências da NBR 7211(2009c).

CAPÍTULO 5 - RESULTADOS E DISCUSSÕES II: PROPRIEDADES DOS CONCRETOS NO ESTADO FRESCO

Para a obtenção de concretos com aplicação na construção civil, é fundamental que a trabalhabilidade seja adequada para as diferentes técnicas de aplicação. O índice de consistência e o calor de hidratação são características de grande relevância no estado fresco.

5.1 ÍNDICE DE CONSISTÊNCIA

A Tabela 11 apresenta os resultados para o IC das nove misturas e a mistura padrão. De acordo com a Tabela, os valores para IC variam com a mudança nos níveis das variáveis A/C, W/C e TC, afetando os valores medidos, quando comparados com a mistura padrão. O IC está diretamente relacionado com a trabalhabilidade dos concretos.

Tabela 11 - Resultados do índice de consistência

Amostra	W/C	A/C	TC (%)	IC (mm)
1	0,28	2,70	10	20
2	0,28	3,10	30	20
3	0,28	3,60	20	10
4	0,33	2,70	30	90
5	0,33	3,10	20	35
6	0,33	3,60	10	20
7	0,4	2,70	20	220
8	0,4	3,10	10	210
9	0,4	3,60	30	120
Padrão	0,33	3,10	0	100

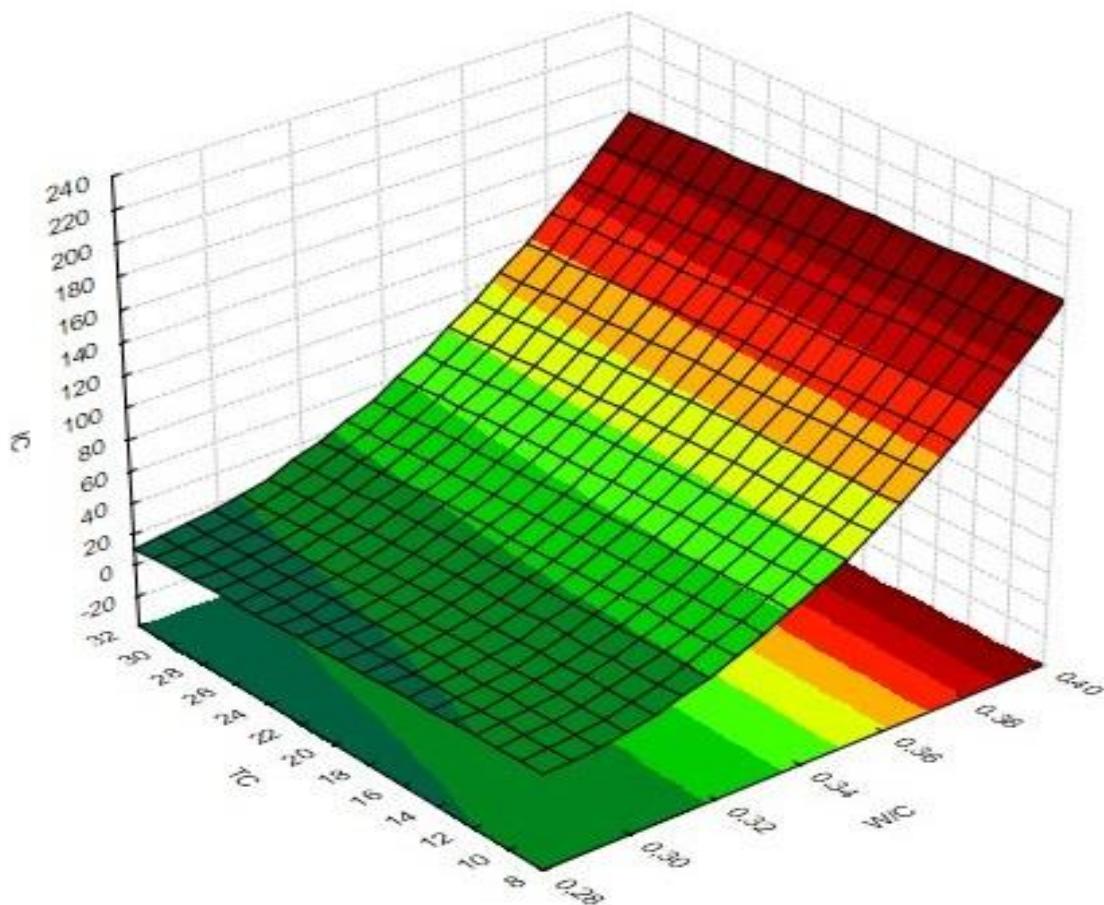
Fonte: o autor

Para uma melhor compreensão e avaliação das interações entre as variáveis (quando existir), o uso da técnica de metodologia de superfícies de resposta (MSR) pode ser utilizada para estimar o efeito dessas variáveis na resposta. A MSR utiliza ferramentas estatísticas de significância e análise de regressão para a obtenção do melhor modelo matemático que represente o efeito dos fatores (as variáveis) nas propriedades. Muitos trabalhos desenvolvidos em pesquisas na UDESC e em outros locais tratam dos procedimentos relacionados com essa técnica (SCHACKOW, 2015; SCHWAAB, 2015; POSSAN; VENQUIARUTTO; DAL MOLIN, 2011, WITZKE *et al.*, 2017)

A Figura 11 apresenta a superfície de resposta para o efeito das variáveis TC e W/C para o valor predito do IC, mantendo a A/C constante em 3,10. As Figuras 12 (áreas) e 13 (linhas)

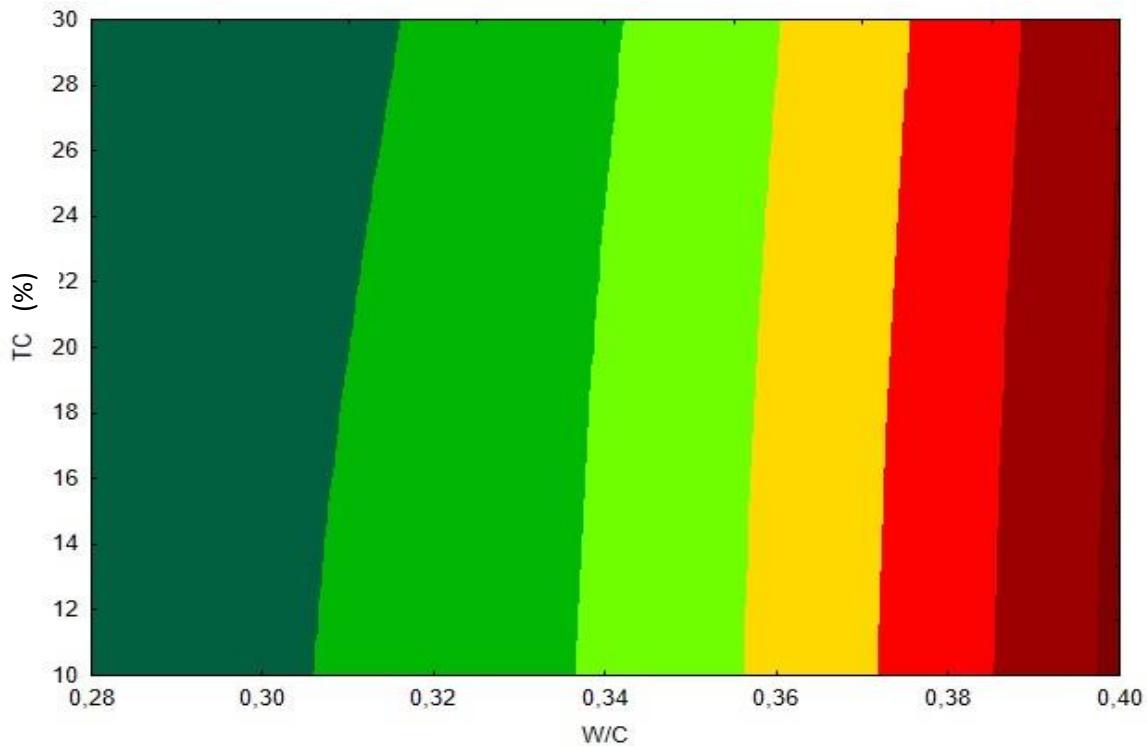
mostram a superfície de resposta como um contorno, na qual curvas de níveis representam os valores específicos para o IC.

Figura 11 - Superfície de resposta para o IC das misturas de concreto, como uma função de TC e W/C, mantendo constante A/C em 3,10.



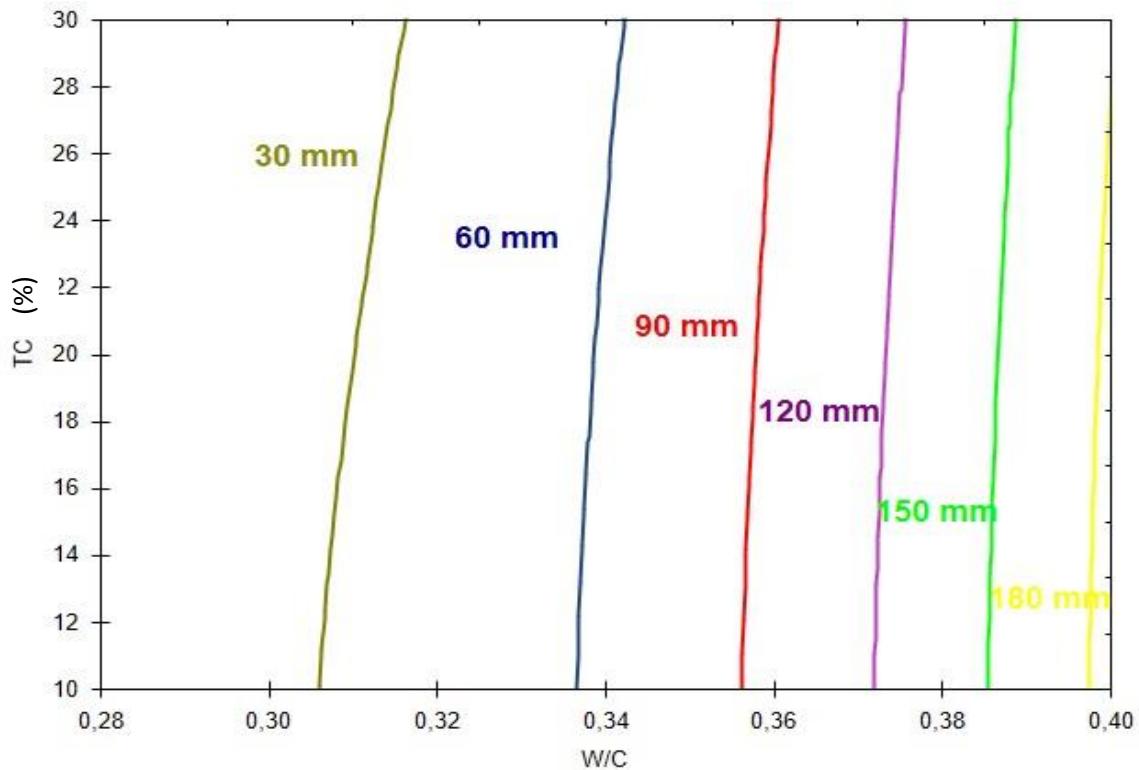
Fonte: o autor.

Figura 12 - Gráfico de contorno (áreas) para o IC das misturas de concretos, como uma função de TC e W/C, mantendo constante A/C a 3,10.



Fonte: o autor.

Figura 13 - Gráfico de contorno (linhas) para o IC das misturas de concretos, como uma função de TC e W/C, mantendo constante A/C a 3,10.



Fonte: o autor.

A Figura 13 mostra que, para os níveis de TC e W/C estudados (mantendo constante A/C a 3,10), o TC não altera o IC, o que indica que a trabalhabilidade independe dos valores percentuais de cinza volante incorporados nas misturas. Obviamente, o W/C é o principal fator que contribui para a variação do IC. Para um teor de A/C constante de 3,10, é possível obter concretos com trabalhabilidade adequada, a qual pode ser estimada a partir das medidas de IC entre 60 mm a 120 mm. Nesse caso, a W/C pode variar de 0,335 a 0,37, para quaisquer valores de TC. Esse comportamento pode ser explicado pelo fato que no início do processo de cura, a cinza volante reage lentamente, tendo em vista que a mesma precisa do Ca(OH)₂ fornecido pela reação de hidratação do cimento com a água (MEHTA; MONTEIRO, 2014). As equações 2, 3 e 4 representam, em termos de equações químicas, o fenômeno durante a hidratação do cimento Portland e a reação da cinza volante.



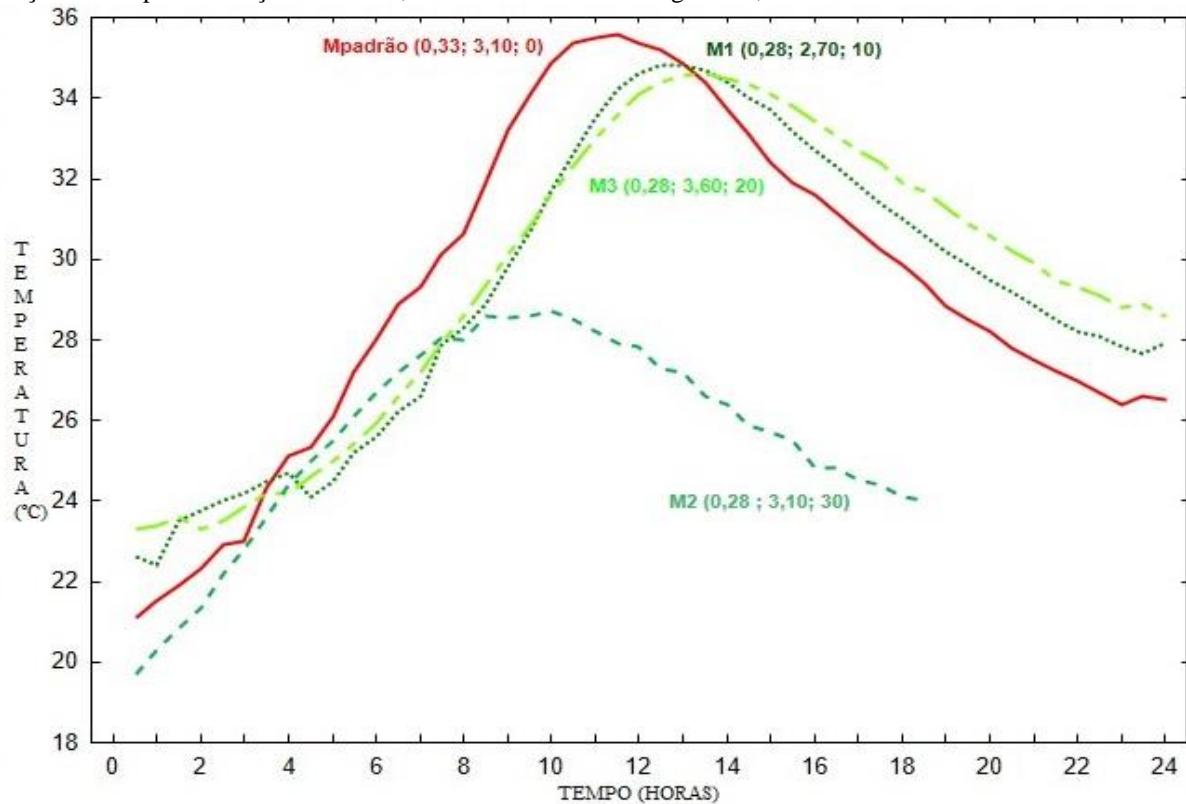
Onde C= CaO; S= SiO₂; H= H₂O

Resultados similares foram obtidos com misturas de concretos contendo cinza volante, sem levar em conta variações nos traços (KURDA; BRITO; SILVESTRE, 2017; SALUM, 2016). As pesquisas anteriores trataram de misturas sem variação dos fatores W/C e A/C, o que limita as conclusões acerca das características dos materiais obtidos, tendo em vista o efeito dos traços nas propriedades (MEHTA; MONTEIRO, 2014; NEVILLE; BROOKS, 2013). Dessa forma, esta pesquisa vem complementar e fornece novas diretrizes para o desenvolvimento e fabricação de concretos contendo cinza volante, do ponto de vista das principais variáveis relacionadas com as misturas.

5.2 CALOR GERADO DURANTE A CURA COMO UMA FUNÇÃO DO TEMPO (CALORIMETRIA)

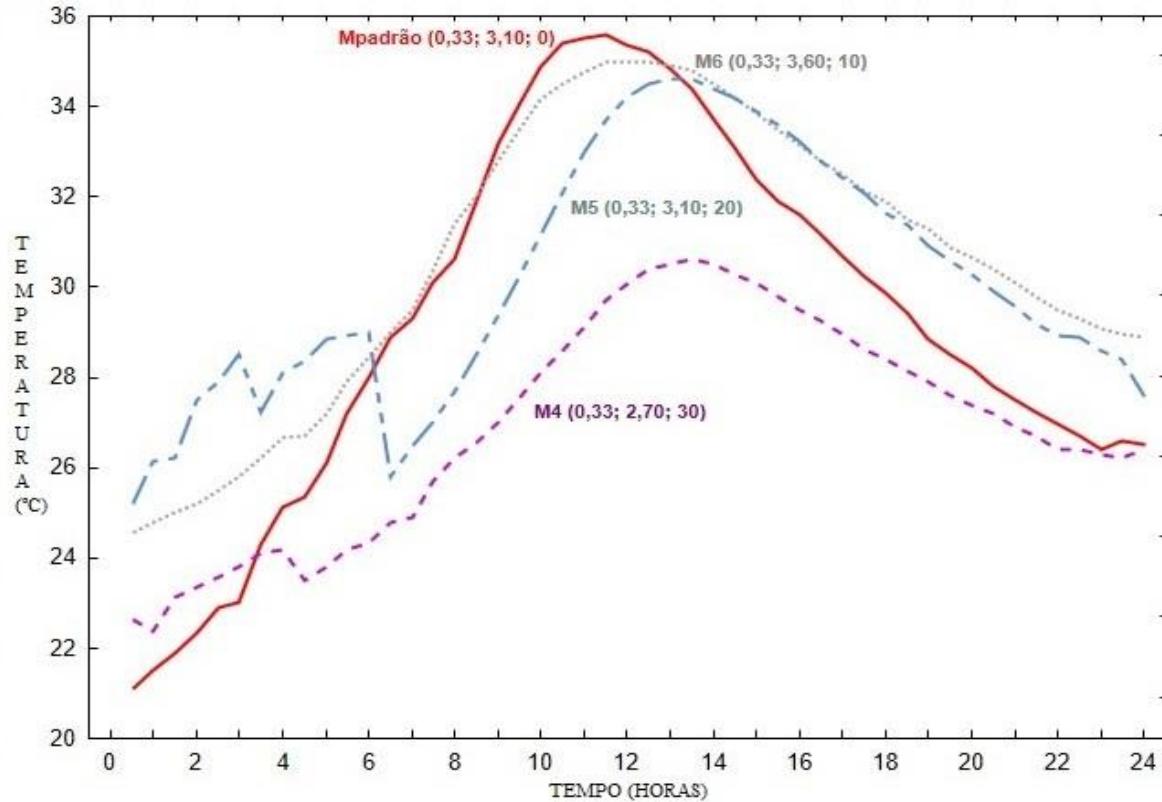
O ensaio de calorimetria avalia o calor de hidratação gerado, por meio da temperatura, como uma função do tempo do ensaio. Os resultados estão mostrados nas Figuras 14, 15 e 16, para misturas que contém teor de W/C igual a 0,28, 0,33 e 0,40, respectivamente.

Figura 14 - Efeito da temperatura do concreto fresco das misturas de concreto padrão, M1, M2 e M3, com uma função do tempo de duração do ensaio, em amostras com W/C igual a 0,28.



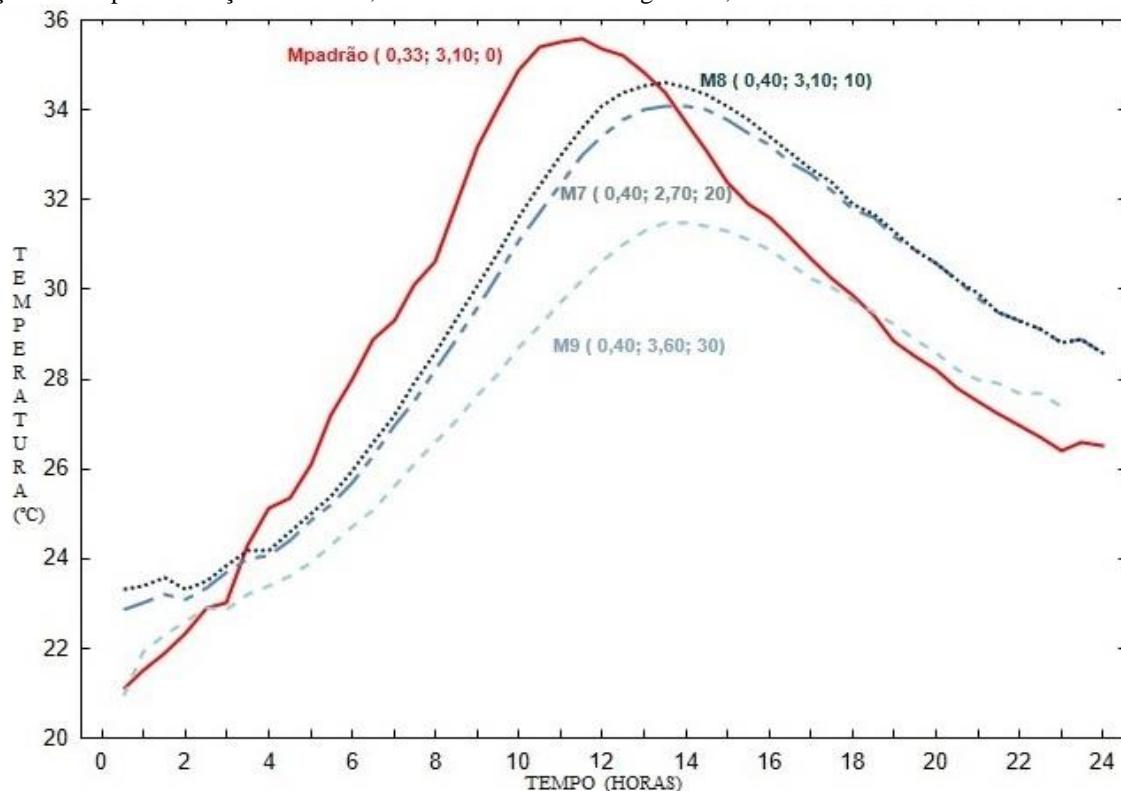
Fonte: o autor.

Figura 15 - Efeito da temperatura do concreto fresco das misturas de concreto padrão, M4, M5 e M6, com uma função do tempo de duração do ensaio, em amostras com W/C igual a 0,33.



Fonte: o autor.

Figura 16 - Efeito da temperatura do concreto fresco das misturas de concreto padrão, M7, M8 e M9, com uma função do tempo de duração do ensaio, em amostras com W/C igual a 0,40.



Fonte: o autor.

As Figuras 14, 15 e 16 mostram que, com a utilização de cinza volante no concreto, o calor de hidratação nas primeiras 24 horas é reduzido, de acordo com as quantidades de cinza volante e as variáveis W/C e A/C. A diminuição do calor de hidratação é maior na M2 (em comparação com a mistura padrão), com o TC de 30 %, W/C de 0,28 e A/C de 3,10 (uma redução de cerca de 8 °C na temperatura máxima). À medida em que diminui o TC e aumenta a W/C, a redução na temperatura máxima em relação à mistura padrão diminui (de cerca de 5 °C na mistura M4 e 4 °C na mistura M9). Com uma maior quantidade de cinza volante na matriz, exige-se mais energia para a reação de hidratação da sílica amorfa com o Ca(OH)₂ produzido pela hidratação do cimento Portland, reduzindo a temperatura do sistema (MEHTA; MONTEIRO, 2014).

Estudos realizados em concretos com substituição de cimento Portland por cinza volante em níveis a cima de 15% tiveram resultados semelhantes e observaram redução significativa na elevação de temperatura nas primeiras 24 horas de cura e picos de temperaturas mais tardios (NILI; SALEHI, 2010; ATIS, 2002; LAWRENCE; CYR; RINGOT, 2005).

Dessa forma, do ponto de vista do concreto fresco, é possível substituir parcialmente cimento Portland por cinza volante em concretos, contribuindo assim a redução na geração de calor e elevação de temperatura nas primeiras 24 horas. Essa substituição contribui para evitar fissurações precoces que podem prejudicar a estabilidade de estruturas de concreto.

CAPÍTULO 6 - RESULTADOS E DISCUSSÕES III – PROPRIEDADES FÍSICAS E MECÂNICAS DO CONCRETO

A resistência à compressão e a absorção de água são características muito importantes para análise das propriedades físicas e mecânicas do concreto endurecido. A partir dessas características é possível ser feito o planejamento adequado para aplicação dos concretos na construção civil.

6.1 RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO APÓS 28 DIAS DE CURA (RC28)

A Tabela 12 apresenta as medidas para o ensaio de resistência à compressão após 28 (RC28) e 60 dias (RC60) de cura.

Tabela 12 - Resultados da resistência à compressão

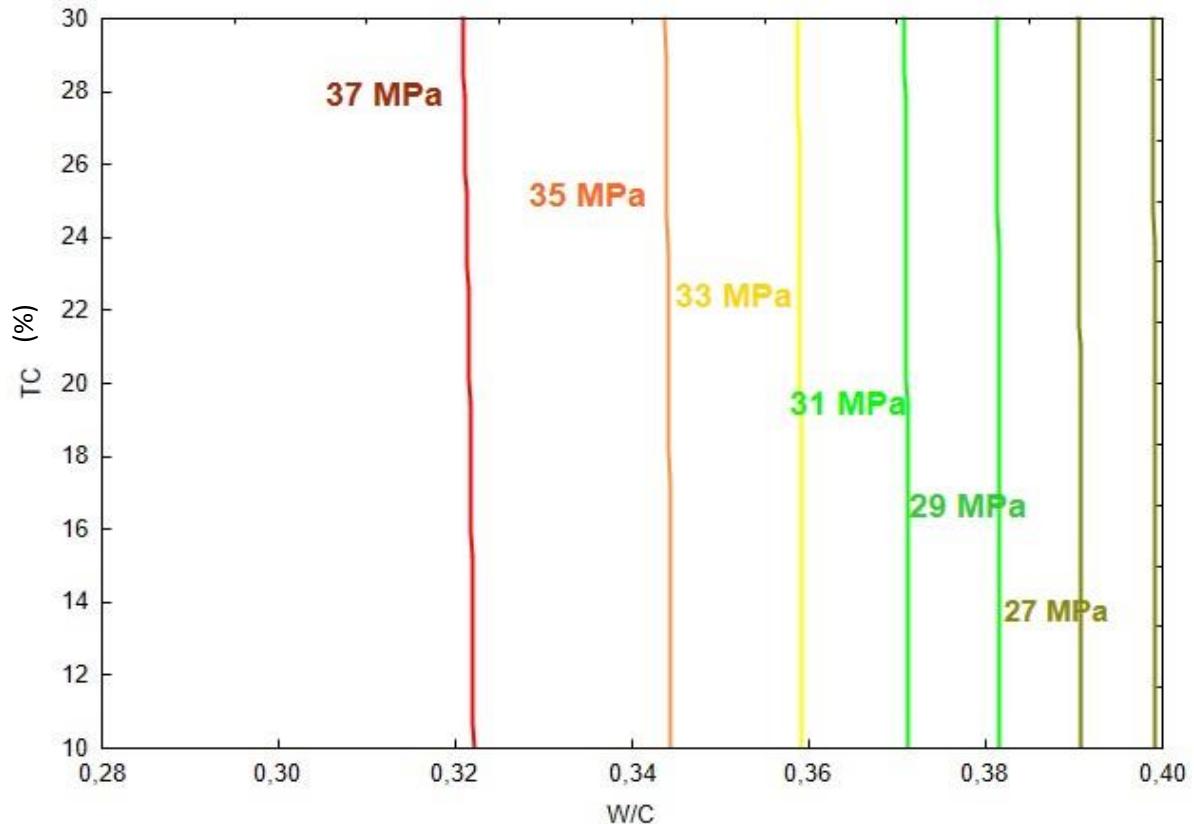
Amostra	W/C	A/C	TC (%)	RC28 (MPa)	RC60 (MPa)
1	0,28	2,70	10	32,46±5,64	36,47±1,36
2	0,28	3,10	30	25,77±0,72	45,57±1,83
3	0,28	3,60	20	39,68±2,25	48,82±5,02
4	0,33	2,70	30	37,29±2,30	41,86±3,73
5	0,33	3,10	20	37,15±3,49	42,49±3,68
6	0,33	3,60	10	34,09±2,11	37,14±5,98
7	0,4	2,70	20	31,34±2,25	38,60±3,04
8	0,4	3,10	10	31,28±3,51	37,05±1,23
9	0,4	3,60	30	30,05±1,35	34,44±1,79
Padrão	0,33	3,10	0	35,47±1,67	36,66±1,74

Fonte: o autor

Da mesma forma que foi realizado para IC, o uso da técnica de metodologia de superfícies de resposta (MSR) pode ser utilizada para estimar o efeito dessas variáveis na resposta. (SCHACKOW, 2015; SCHWAAB, 2015; POSSAN; VENQUIARUTTO; DAL MOLIN, 2011, WITZKE *et al.*, 2017).

A Figura 17 mostra o efeito da RC28 por meio de um gráfico de contorno, como uma função de TC e W/C (mantendo A/C constante em 3,10) para as misturas estudadas.

Figura 17 - Gráfico de contorno de linhas para RC28 das misturas de concreto, como uma função de W/C e TC, mantendo-se constante A/C a 3,10.



Fonte: o autor.

A Figura 17 mostra que o TC não afeta a RC28, a qual é fortemente dependente da W/C. Ainda de acordo com a Figura 17, é possível obter parâmetros para a produção de concretos estruturais com resistência superior a 29 MPa após 28 dias de cura, usando W/C inferiores a 0,38, e quaisquer valores de substituição de cimento Portland por cinza volante, dentro dos padrões estudados (mantendo a A/C constante em 3,10). Usando A/C de 2,7 ou 3,6, é possível obter concretos com RC28 superior a 30 MPa. Com uma menor W/C, a matriz gera menos calor e menor porosidade, contribuindo, assim, para uma maior RC28 (MEHTA; MONTEIRO, 2014).

Vários estudos de concretos com substituição de cimento Portland por cinza volante revelaram que teores de substituição entre 15 e 30%, com W/C igual a 0,40 não alteraram RC28 (SALUM, 2016). A pesquisa de Cézar (2011), que utilizou níveis de 0,45, 0,55 e 0,65 para W/C, e TC constante em 20%, observou que quanto maior o nível de W/C, menores foram os resultados apresentados para RC28. Outro estudo que variou W/C entre 0,40 e 0,75, A/C constante e TC de até 50%, mostrou que todas as amostras de concreto que tiveram cinza volante apresentaram resultados para RC28 inferiores a amostra de referência (SILVEIRA, 2004).

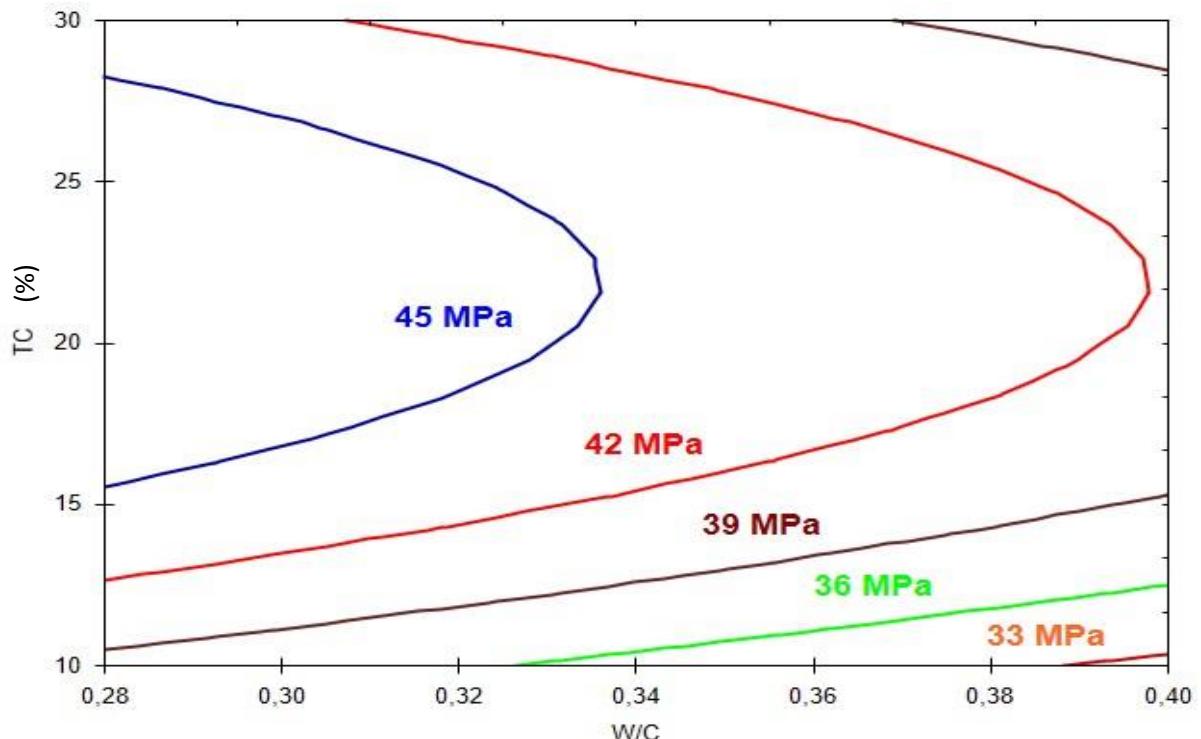
As pesquisas anteriores trataram de concretos sem variação, simultaneamente, de teores de W/C, A/C e TC. Em contrapartida, o presente estudo, ao diversificar os níveis das variáveis, conseguiu mostrar que é possível obter parâmetros para a produção de concretos com cinza volante com resistência igual ou superior ao concreto de referência.

6.2 RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO APÓS 60 DIAS DE CURA (RC60)

Da mesma forma que foi realizado para IC e RC28, o uso da técnica de metodologia de superfícies de resposta (MSR) pode ser utilizada para estimar o efeito dessas variáveis nas respostas de RC60. (SCHACKOW, 2015; SCHWAAB, 2015; POSSAN; VENQUIARUTTO; DAL MOLIN, 2011; WITZKE *et al.*, 2017).

A Figura 18 mostra o efeito da RC60 por meio de um gráfico de contorno, como uma função de TC e W/C, mantendo A/C constante em 3,10, para as misturas estudadas.

Figura 18 - Gráfico de contorno de linhas para RC60 das misturas de concreto, como uma função de W/C e TC, mantendo-se constante A/C em 3,10.



Fonte: o autor.

Diferentemente do que foi observado para RC28, a Figura 18 mostra que TC e W/C afetam RC60. A Figura mostra ainda que é possível obter parâmetros para a confecção de concretos estruturais com RC60 igual a 39 MPa utilizando qualquer valor de W/C dentro dos

valores estudados, A/C constante em 3,1 e TC entre 11 e 15%. É possível, também, ter parâmetros para a obtenção de concretos com 45 MPa de resistência à compressão após 60 dias de cura, adotando-se entre 16 e 28% de TC, A/C constante em 3,10 e W/C entre 0,28 e 0,335. A cinza volante continua reagindo com o hidróxido de cálcio, em temperatura normal, após os 28 dias de cura, formando silicato de cálcio adicional, reduzindo a porosidade na matriz cimentícia e, consequentemente, afetando RC60, diferentemente do que ocorreu em RC28.

Estudos mostraram que a cinza volante influencia as propriedades mecânicas do concreto em idades superiores a 28 dias de cura (A/C variando entre 0,40 e 0,75). Além de, ao manter-se A/C e W/C constantes, todas as amostras com cinza volante tiveram RC60 menor que a amostra padrão (SILVEIRA, 2004).

As pesquisas mostraram que sem a variação de W/C e A/C, não se obtêm concretos com cinza volante com RC60 superior ao concreto de referência. Em contrapartida, o presente estudo, ao variar os níveis de TC juntamente com W/C e A/C, conseguiu obter resultados superiores de RC60 em comparação com o concreto de referência, contribuindo para a confecção de novas misturas de concreto.

6.3 ABSORÇÃO DE ÁGUA (AA)

A Tabela 13 mostra as medidas para o ensaio de absorção de água para as misturas estudadas.

Tabela 13 - Resultados do ensaio de absorção de água

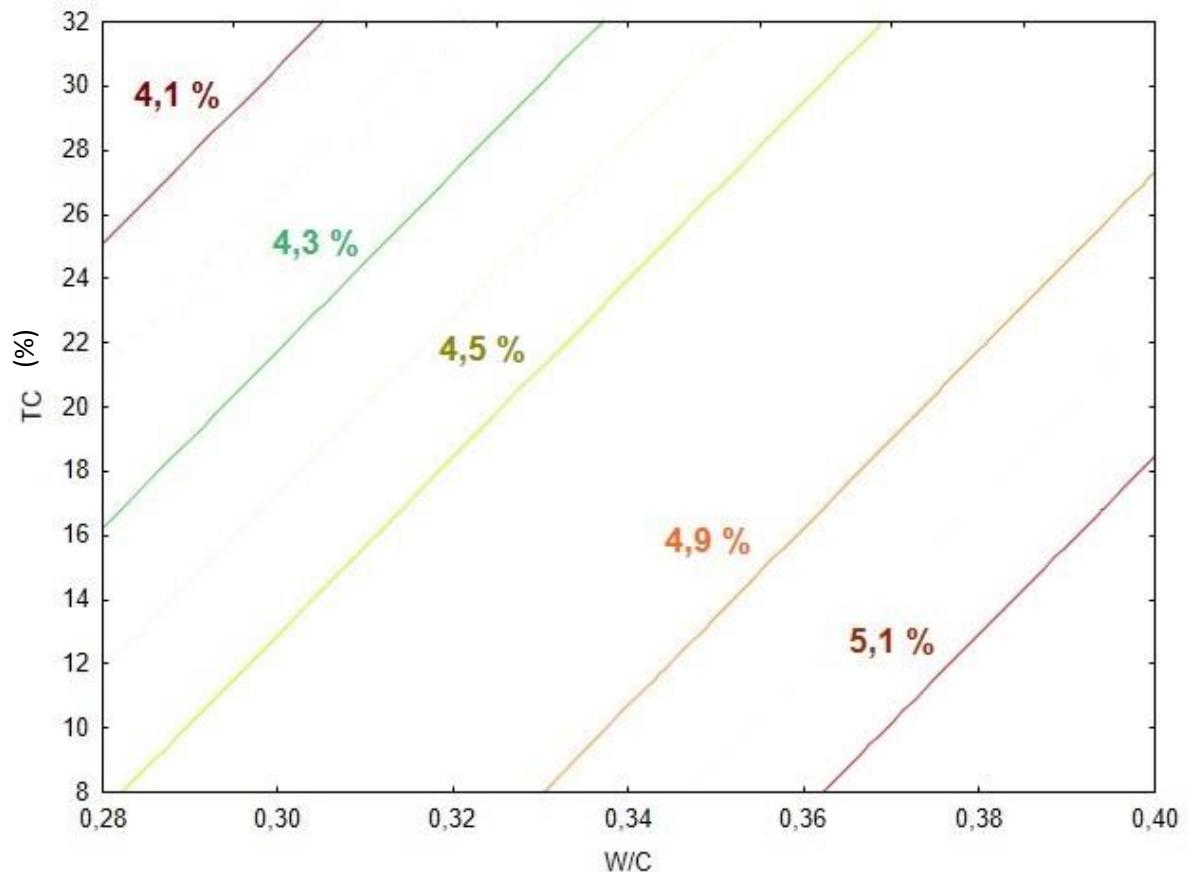
Amostra	W/C	A/C	TC (%)	AA
1	0,28	2,70	10	5,47±0,40
2	0,28	3,10	30	4,06±0,03
3	0,28	3,60	20	3,60±0,58
4	0,33	2,70	30	4,35±0,30
5	0,33	3,10	20	4,38±0,33
6	0,33	3,60	10	4,64±0,35
7	0,4	2,70	20	6,08±0,67
8	0,4	3,10	10	4,44±0,10
9	0,4	3,60	30	4,79±0,52
Padrão	0,33	3,10	0	5,01±0,59

Fonte: o autor.

Para o ensaio de absorção de água, assim como utilizado para IC, RC28 e RC60, o uso da técnica de metodologia de superfícies de resposta (MSR) foi utilizada a fim de estimar o efeito das variáveis na resposta (SCHACKOW, 2015; SCHWAAB, 2015; POSSAN; VENQUIARUTTO; DAL MOLIN, 2011; WITZKE *et al.*, 2017).

A Figura 19 mostra o efeito da absorção de água para as misturas estudadas, como uma curva de contorno obtida a partir de uma superfície de resposta, mantendo-se A/C constante em 3,10.

Figura 19 - Gráfico de contorno de linhas para AA das misturas de concreto, como uma função de W/C e TC, mantendo-se constante A/C em 3,10.



Fonte: o autor.

A Figura 19 mostra que AA é influenciada por W/C e TC. De acordo com a Figura 19 é possível obter concretos com AA igual a 5,1% mantendo-se A/C constante em 3,10, W/C variando entre 0,36 e 0,40 e TC entre 8 e 18%. Além disso, é possível obter concretos com 4,5% de AA, mantendo-se constante A/C em 3,10, W/C entre 0,28 e 0,37 e qualquer valor de TC, dentro dos padrões estudados. Com uma maior quantidade de cinza volante na massa, ocorre o refinamento dos poros, bem como uma menor W/C acarreta em menor porosidade na matriz (NEVILLE; BROOKS, 2013).

Estudos como o de Frizzo (2001) e Frizzo, Isaía e Gastaldini (2002), ao confeccionar concretos com W/C de 0,35, 0,50 e 0,65, e TC de 25 e 50%, revelaram que misturas de concreto com maiores TC apresentaram menor absorção de água. Os trabalhos mostraram, também, que concretos com menor W/C tiveram menor AA, sem o inter-relacionamento entre esses dois fatores.

Os trabalhos da literatura mostraram a diminuição da absorção de água com o aumento de TC e menor W/C. O presente estudo contribui para as pesquisas ao analisar conjuntamente os dois fatores, mostrando o comportamento da propriedade.

6.4 ESCOLHA DOS MELHORES CONCRETOS COM PROPRIEDADES ÓTIMAS E MENOR CUSTO

O uso de técnicas de planejamento experimental por meio do projeto fatorial fracionado permite fazer várias simulações para as propriedades, como uma função dos parâmetros de processo. Neste caso, foi feita uma estimativa para a obtenção de misturas de concretos, sujeitas às restrições nas propriedades, envolvendo o custo dos materiais durante o possível processo de produção. Com os resultados obtidos das análises de regressão, é possível desenvolver um processo de otimização gráfica para a obtenção dos melhores parâmetros para características específicas de produtos (BUTTON, 2005; BHATTI, 2010).

6.4.1 Custo dos concretos obtidos como uma função dos materiais

A Tabela 14 apresenta os valores calculados para o custo das misturas de concretos, como uma função dos materiais utilizados (cimento Portland, água, agregados e cinza volante).

Tabela 14 - Custo dos concretos

Amostra	W/C	A/C	TC (%)	Custo (R\$/m ³)
1	0,28	2,70	10	R\$292,27
2	0,28	3,10	30	R\$253,54
3	0,28	3,60	20	R\$286,18
4	0,33	2,70	30	R\$246,20
5	0,33	3,10	20	R\$276,84
6	0,33	3,60	10	R\$309,21
7	0,4	2,70	20	R\$269,53
8	0,4	3,10	10	R\$299,89
9	0,4	3,60	30	R\$263,17
Padrão	0,33	3,10	0	R\$322,99

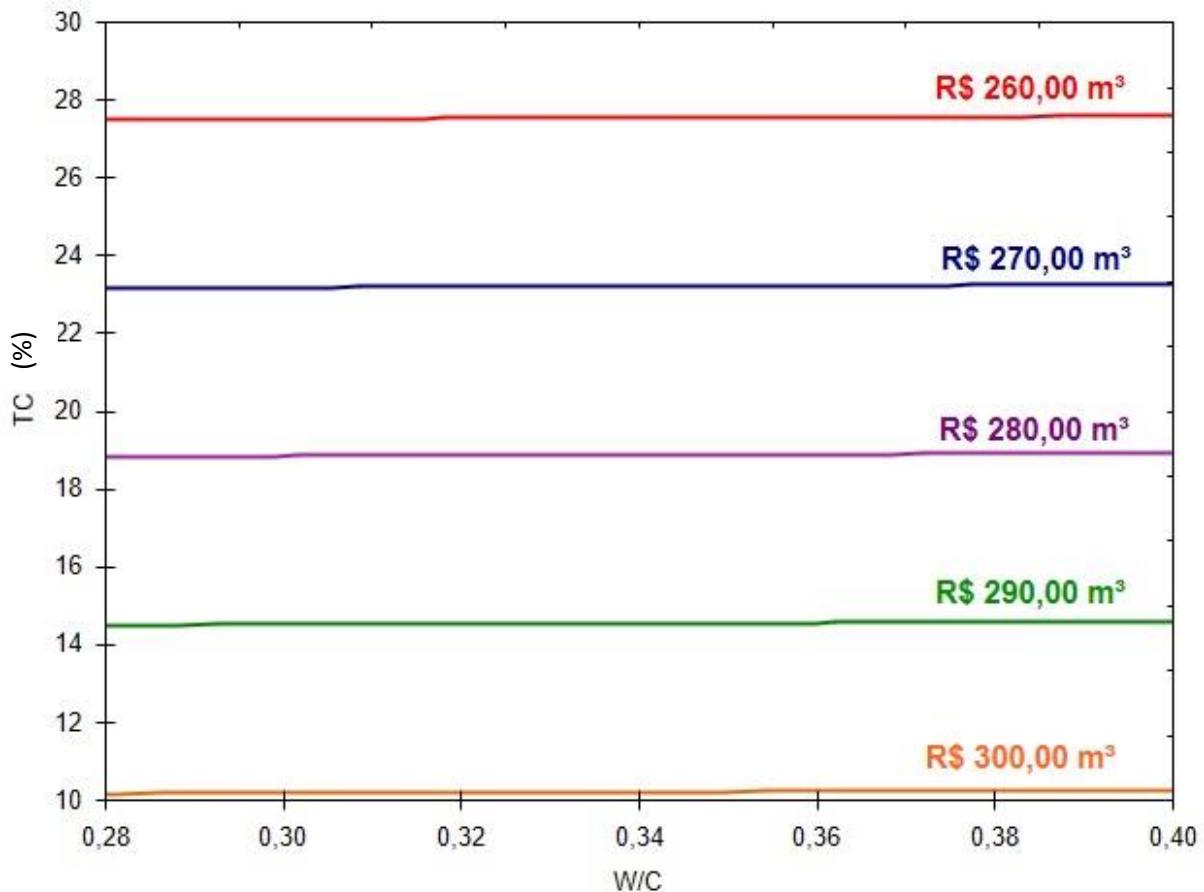
Fonte: o autor

A Tabela 14 indica que todas as amostras com cinza volante em sua composição tiveram menor custo que a amostra de referência, independentemente de A/C e W/C.

Para a determinação do custo, assim como utilizado para outras propriedades dessa pesquisa, o uso da técnica de metodologia de superfícies de resposta (MSR) foi utilizada a fim de estimar o efeito das variáveis na resposta (SCHACKOW, 2015; SCHWAAB, 2015; POSSAN; VENQUIARUTTO; DAL MOLIN, 2011; WITZKE *et al.*, 2017).

A Figura 20 mostra o efeito do custo (em R\$/m³), com gráfico de contorno, como uma função de TC e W/C, mantendo A/C constante em 3,1.

Figura 20 - Gráfico de contorno de linhas para custo das misturas de concreto, como uma função de W/C e TC, mantendo-se constante A/C em 3,10.



Fonte: o autor

A Figura 20 revela que o custo do concreto (em R\$/m³) diminui na medida em que aumenta o TC. A Figura revela, também, que é possível obter concretos com custo de R\$ 290,00/m³, mantendo-se A/C constante em 3,1, TC entre 14 e 15% e qualquer valor de W/C.

Ou ainda, concreto com custo de R\$ 260,00 m³ mantendo-se A/C constante em 3,1, TC entre 27 e 28 % e qualquer valor de W/C, dentro dos padrões estudados.

Dessa forma, o uso de cinza volante em concretos, além da melhoria das propriedades a fresco e endurecido, pode vir a ser uma grande alternativa para a redução de custo de concretos para construção civil.

6.4.2 Determinação das variáveis de misturas sujeitas às restrições na trabalhabilidade, principais propriedades no estado endurecido e custo dos materiais

A escolha dos parâmetros de mistura, sujeitas às restrições na trabalhabilidade, principais propriedades no estado endurecido e custo dos materiais foi realizada supondo que os concretos possam ser fabricados com finalidade estrutural em obras civis. Para tanto, com base na literatura (ABNT, 2015a; ARAÚJO; DIAS, 2011; SINAPI, 2017), foram estabelecidos alguns parâmetros para IC, RC28, AA e custo. Conforme equações 5, 6, 7 e 8.

$$60 \text{ mm} \leq \text{IC} \geq 120 \text{ mm} \quad (5)$$

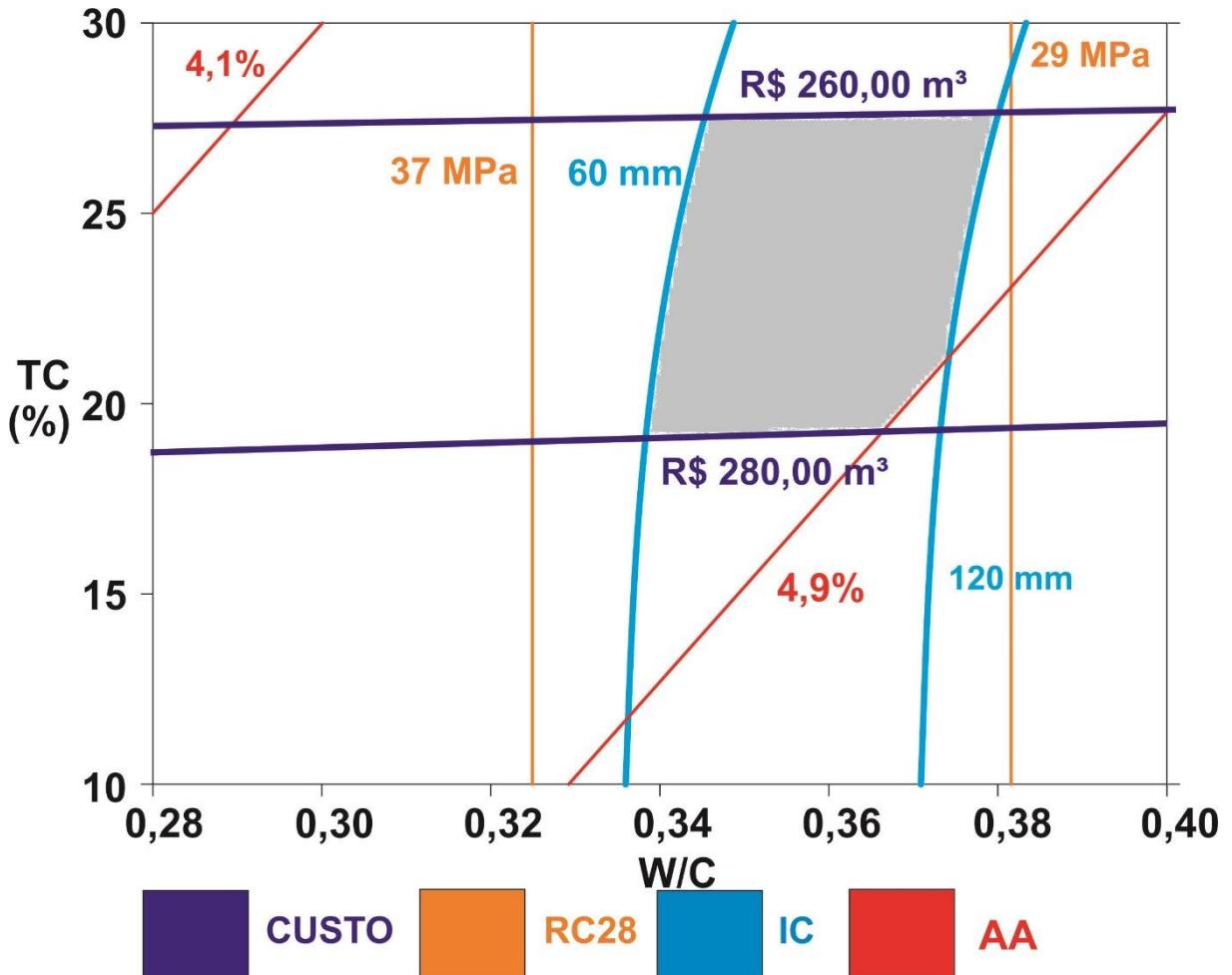
$$\text{RC28} \geq 29 \text{ MPa} \quad (6)$$

$$\text{AA} \leq 4,9 \% \quad (7)$$

$$\text{R\$ } 260,00 \text{ m}^3 \leq \text{Custo} \leq \text{R\$ } 280,00 \text{ m}^3 \quad (8)$$

A Figura 21 apresenta o gráfico da sobreposição dos contornos do resultado da predição das propriedades IC, RC28, AA, assim como do custo, com as restrições impostas pelas Eq. 5, 6, 7 e 8 (BUTTON, 2005; BHATTI, 2000). A Figura 22 também mostra a região viável, a qual faz uma estimativa das variáveis W/C, A/C e TC para a produção de concretos estruturais, com as propriedades desejadas, mantendo-se A/C constante em 3,10.

Figura 21 - Gráfico de contorno de linhas para IC, RC28 e AA das misturas de concreto, como uma função de W/C e TC, mantendo-se constante A/C em 3,10.



Fonte: o autor.

A Figura 21 revela a existência de uma área (*hachurada*) que atende todas as exigências das Equações 5, 6 e 7 e a obtenção de concretos com aplicabilidade na construção civil com TC entre 19 e 27 %, W/C entre 0,335 e 0,37 e A/C constante em 3,10. Por exemplo: TRAÇO 1: (W/C: 0,34; TC: 20% e A/C 3,10) com custo estimado de R\$ 280,00 por m³ ou ainda TRAÇO 2: (W/C: 0,38; TC: 27% e A/C: 3,10) com custo estimado de R\$ 260,00 por m³, e assim por diante.

6.4.3 Classificação das misturas de concreto

As Tabelas 15 e 16 apresentam a classificação do concreto segundo a NBR 8953, com intervalos menores e aplicáveis aos resultados obtidos pela Figura 13. A partir das Tabelas 15 e 16 é possível classificar e aplicar os concretos obtidos em obras civis como material estrutural.

Tabela 15 - Classificação de concreto para fins estruturais (IC)- NBR 8953 (2015)

Classe	Grupo de resistência	Resistência característica à compressão (MPa)
		C25
I	C30	30
	C35	35

Fonte: ABNT (2015a) – adaptado

Tabela 16 - Classificação de concreto para fins estruturais (RC28) - NBR 8953 (2015)

Classe	Abatimento (mm)	Aplicações típicas
S50	$50 < A < 100$	Alguns tipos de pavimentos e de elementos de fundações
S100	$100 < A < 160$	Elementos estruturais, com lançamento bombeado do concreto

Fonte: ABNT (2015a) - adaptado

As Tabelas 15 e 16 mostram a classificação dos concretos obtidos na presente pesquisa, que dentro dos intervalos adotados, possuem classe de resistência à compressão C25 e C30, e índice de consistência com classe S50 e S100. Dessa forma, a Tabela 17 mostra a classificação para o índice de consistência e resistência à compressão dos dois traços selecionados.

Tabela 17 - Classificação das misturas de concreto selecionadas.

Traço	W/C	TC (%)	A/C	Classificação para IC	Classificação para RC28	Custo (R\$/m³)
1	0,34	20	3,10	S50	C35	280,00
2	0,38	27	3,10	S100	S25	260,00

Fonte: o autor.

Assim, os concretos selecionados (traços 1 e 2) apresentam características satisfatórias para aplicação na construção civil, com utilização estrutural em fundações ou para elementos estruturais sem bombeamento, além de alguns tipos de pavimentos, com custo mais baixo que concretos convencionais.

CAPÍTULO 7 - RESULTADOS E DISCUSSÕES IV: CARACTERIZAÇÕES COMPLEMENTARES DOS CONCRETOS

Visando entender os resultados das propriedades no estado endurecido, do ponto de vista da microestrutura, ensaios de caracterização microestrutural, assim como características de durabilidade são contemplados neste capítulo. Para complementar os bons resultados obtidos com o uso de cinza volante, uma abordagem do ciclo de vida envolvido no processo é discutida.

7.1 MICROSCOPIA ELETRÔNICA DE VARREDURA – MEV

A Tabela 18 apresenta o traço de misturas selecionadas para a caracterização microestrutural por meio do MEV, bem como sua resistência média à compressão aos 28 dias (RC28).

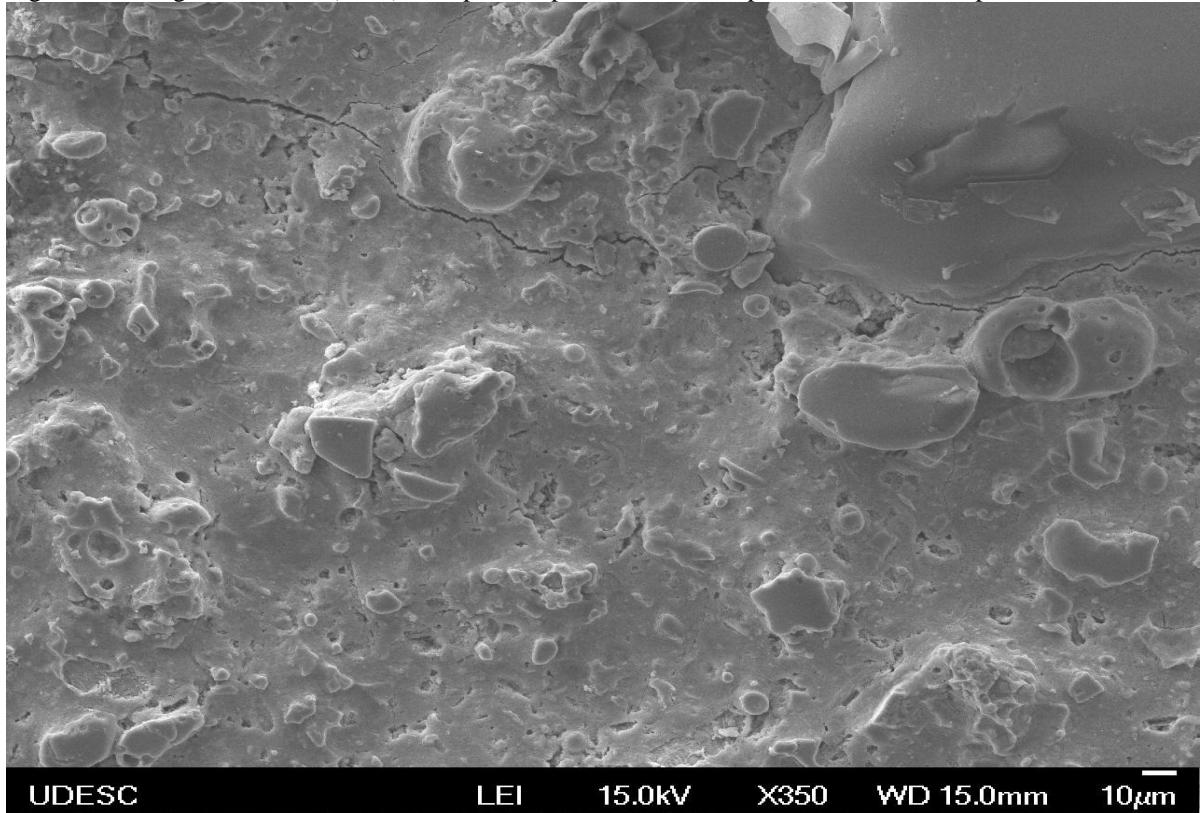
Tabela 18 - Resultados de RC28 das amostras selecionadas

Amostra	W/C	A/C	TC (%)	RC28 (MPa)
4	0,33	2,70	30	37,29±2,30
Padrão	0,33	3,10	0	35,47±1,67

Fonte: o autor

As Figuras 22 e 23 apresentam imagens de MEV, por meio de elétrons secundários, SE (350x) de superfícies polidas das amostras padrão e 4, obtidas das amostras do ensaio de compressão após 28 dias de cura. As Figuras 22 e 23 revelam características típicas de concretos com cimento Portland.

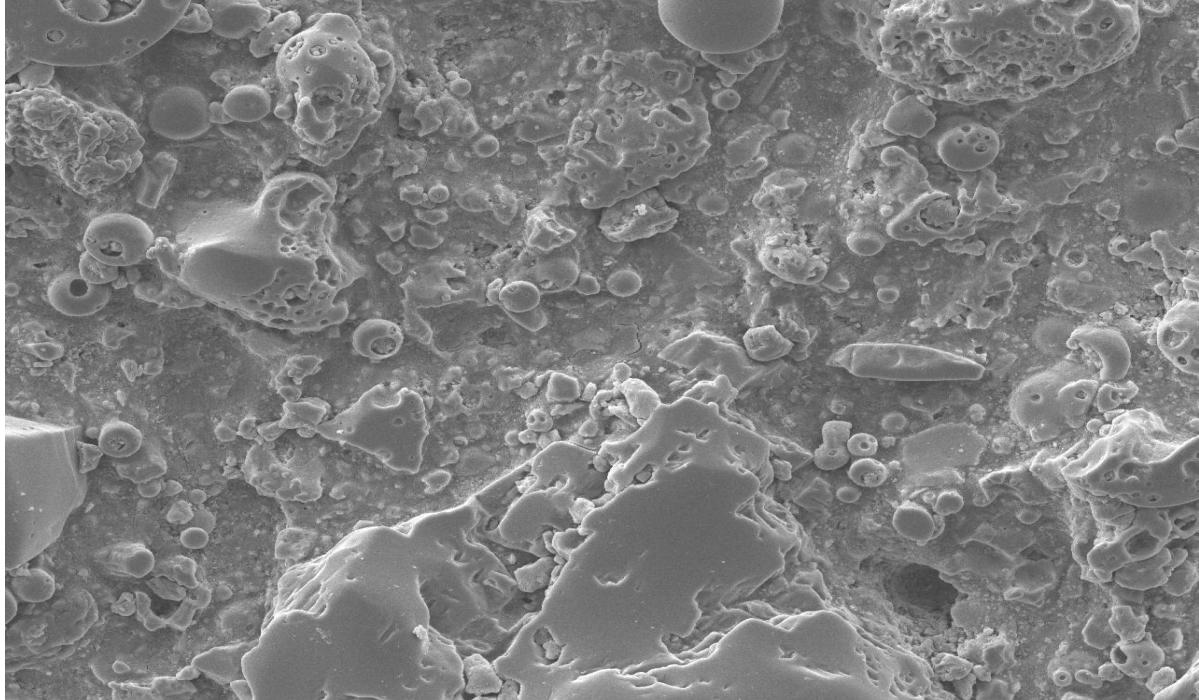
Figura 22 - Imagem MEV SE (350x) da superfície polida da amostra padrão de concreto, após 60 dias de idade.



UDESC LEI 15.0kV X350 WD 15.0mm 10 μ m

Fonte: o autor.

Figura 23 - Imagem MEV SE (350x) da superfície polida da amostra de concreto 4, após 60 dias de idade.



UDESC LEI 15.0kV X350 WD 15.0mm 10 μ m

Fonte: o autor.

A Figura 22 revela a microestrutura coesa da amostra de concreto padrão, com características típicas tais como a densidade e a porosidade, além de evidenciar os componentes e a morfologia amorfa do gel C-S-H. Entretanto, a Figura 22 apresentou fissuras na amostra, que podem ser oriundas do alto calor de hidratação da massa. A Figura 23 revela a microestrutura coesa da amostra 4, com menor porosidade e sem a presença de trincas, o que pode estar relacionado ao menor calor de hidratação da matriz. Além disso, a Figura 23 mostra a pasta mais homogênea da superfície bem como as diversas partículas esféricas de cinza volante, que ainda não reagiram.

Estudos mostraram que o tempo de duração da reação das cinzas volantes no concreto se inicia mais tarde e é mais prolongado que o do cimento Portland. Além disso, concretos com cinza volante e, consequentemente, reações de hidratação mais lentas e demoradas têm calor de hidratação inferior aos concretos tradicionais, ocasionando menor fissuração no concreto. A cinza volante é responsável, ainda, pelo refinamento dos poros do concreto. Tais fatos contribuem para uma melhora na resistência à compressão do concreto (MEHTA; MONTEIRO, 2014; AHMARRUZAMAN, 2010; BRIZOLA, 2007).

Dessa forma, o presente trabalho mostra por meio da microestrutura do concreto, a presença de cinzas volantes que ainda não reagiram na hidratação do concreto. Além disso, sinaliza que concretos com maior teor de cinza volante apresentam menor quantidade de poros e fissuras.

7.2 DURABILIDADE – RESISTÊNCIA AO ATAQUE DE SULFATO (RSUL)

A Tabela 19 mostra as medidas para a absorção de água dos concretos antes e depois da exposição de 30 ciclos de ataque acelerado de sulfato.

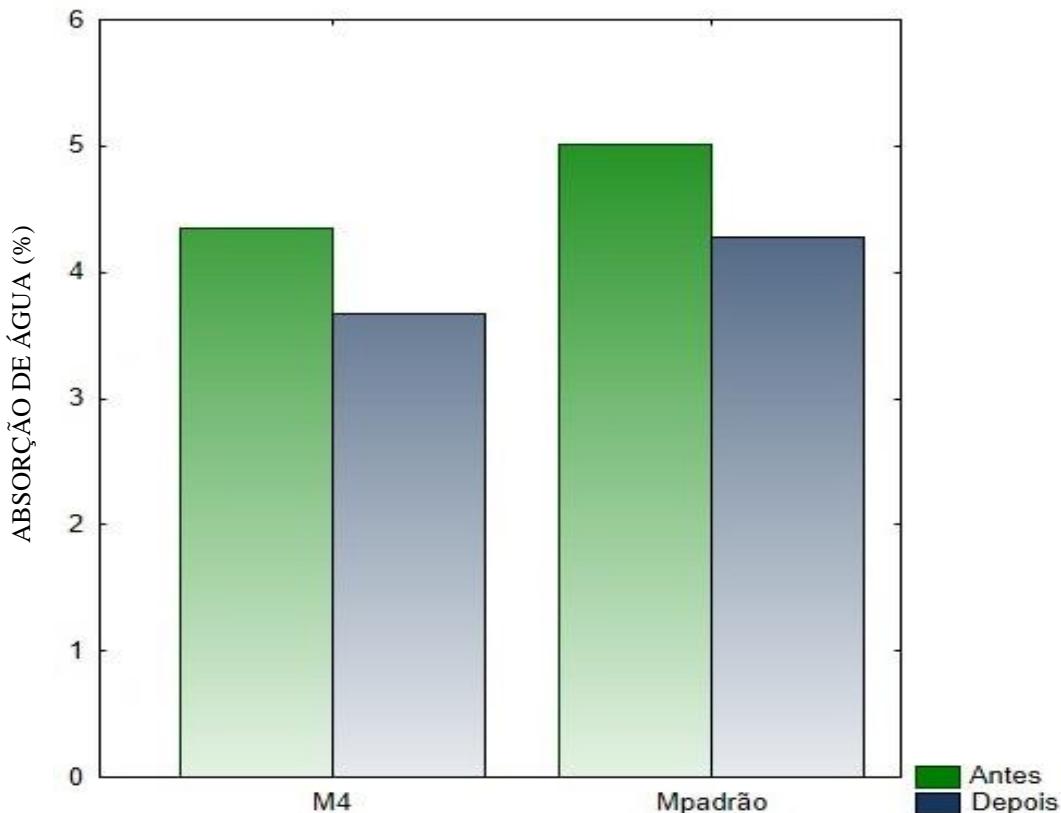
Tabela 19 - Índice de absorção de água das amostras de concreto antes e depois da exposição ao ataque de sulfato e sua variação (em %).

Misturas	W/C	A/C	TC (%)	Absorção de água antes da exposição ao ataque de sulfato	Absorção de água depois da exposição ao ataque de sulfato	Diferença (%)
4	0,33	2,70	30	4,35	3,67	15,6
Padrão	0,33	3,10	-	5,01	4,28	14,5

Fonte: o autor.

A Figura 24 apresenta o comportamento das misturas de concreto frente ao ataque de sulfato, por meio da diferença da massa média dos corpos de prova de cada mistura, antes e depois da exposição de 30 ciclos de ataque de sulfato.

Figura 24 - Absorção de água (em%) de M4 e Mpadrão antes e depois de 30 ciclos de ataque de sulfato



Fonte: o autor.

A Figura 24 e a Tabela 19 revelam a diminuição da absorção de água (em %) nos concretos.

Estudos explicam que o ataque de sulfato em concretos inclui dois períodos distintos. O ganho de massa e preenchimento dos poros pelos produtos expansivos; e a expansão da massa, quebra e perca de material (SANTHANAN; COHEN; OLEK, 2002). Outros estudos utilizaram em suas pesquisas com argamassas o mesmo método de ataque de sulfato, que apresentou expansão até, em média, o 10º ciclo. Após esse período, as amostras perderam massa e deterioraram gradativamente. A presente pesquisa não obteve o mesmo resultado por se tratar de concreto, com porosidade e índice de vazios menores que de argamassas. Nesse caso, o sulfato não penetrou de forma tão eficiente e, consequentemente, não foi possível a verificação de todo o ciclo de expansão e posterior fissuração da massa (SCHAKOW, 2015; PCZIECZEK, 2017).

Dessa forma, o presente trabalho mostrou parte do primeiro período (dos dois períodos citados) do ataque de sulfato, no qual há a expansão dos produtos nos poros e, consequentemente, menor absorção de água. O segundo período poderia ter sido verificado com a continuação dos ciclos. Tendo em vista que não houve tempo hábil para continuação do

estudo, porém, decidiu-se apresentar os resultados de absorção de água após os 30 primeiros ciclos.

7.3 DURABILIDADE – RESISTÊNCIA À ABRASÃO SUPERFICIAL (RAS)

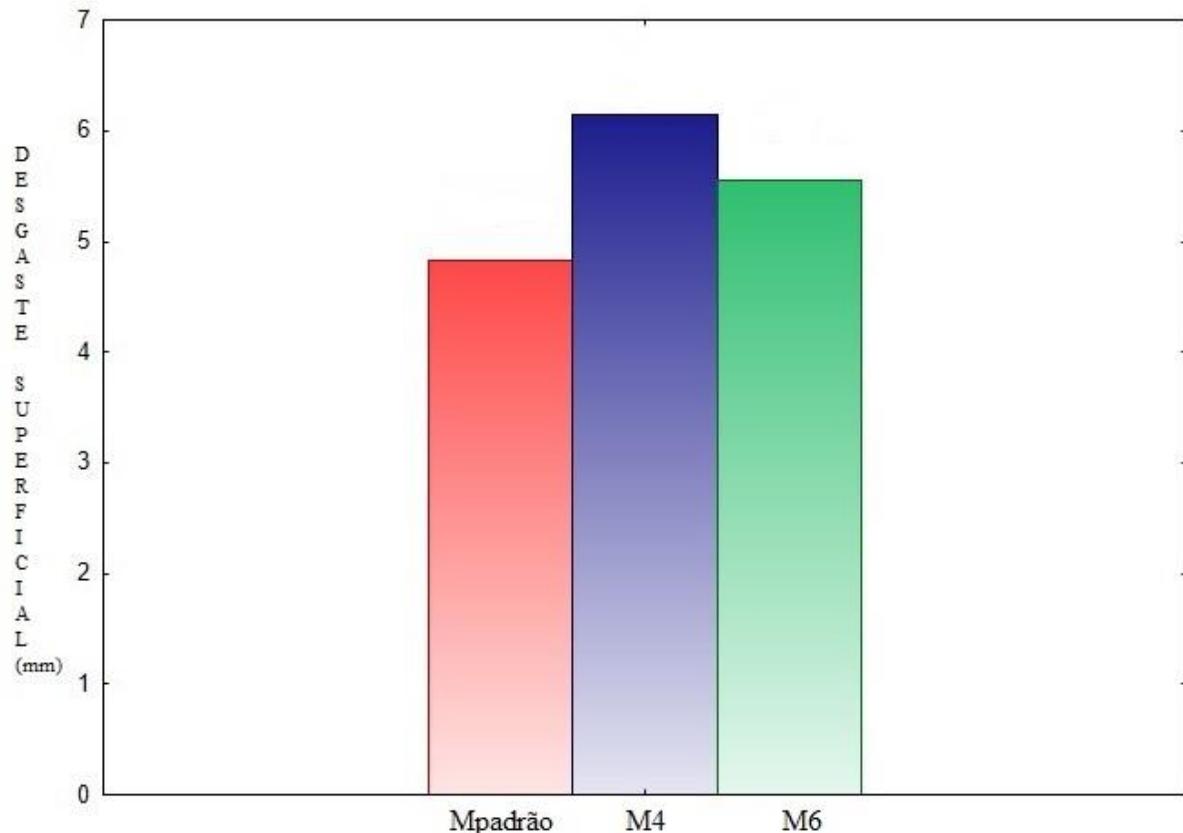
A Tabela 20 e a Figura 25 apresentam os resultados para a RAS das misturas 4, 6 e padrão. De acordo com a tabela, os valores para RAS variam com a mudança de TC e A/C, afetando os valores medidos, quando comparados com a amostra de referência.

Tabela 20 - Resultados do ensaio de abrasão superficial

Amostra	W/C	A/C	TC (%)	RAS (mm)
4	0,33	2,70	30	6,14±0,31
6	0,33	3,60	10	5,56±0,01
Padrão	0,33	3,10	0	4,83±0,11

Fonte: o autor.

Figura 25 - Gráfico dos resultados do ensaio de abrasão superficial



Fonte: o autor.

A Figura 26 mostra que os resultados para abrasão superficial, das amostras com cinza volante, foram superiores ao da amostra padrão. Pesquisas anteriores concluíram que a

substituição de cimento por quaisquer adições minerais, (entre 10 e 25%) e com W/C constante, aumentam o desgaste físico por abrasão superficial (ALMEIDA; GONÇALVES; VIEIRA, 1999). Outro estudo que investigou as características de abrasão superficial de concretos com 20 e 40% de substituição de CP por cinzas volantes mostrou que todos os concretos tiveram perda de massa maior que o concreto sem cinza, devido ao desgaste por abrasão (CAI *et al.*, 2016).

Dessa forma, o presente trabalho contribui para a literatura ao mostrar que o desgaste por abrasão superficial é influenciado negativamente pela cinza volante, levando em consideração o baixo número de trabalhos na área, considera-se a presente pesquisa como de contribuição considerável ao conjunto de pesquisas sobre o tema.

7.4 AVALIAÇÃO DO CICLO DE VIDA – ACV

A partir da avaliação de ciclo de vida, foi possível verificar a carga ambiental para a produção de cada mistura de concreto estudada. A Tabela 21 apresenta em (%), a contribuição de cada componente do concreto na geração de carga ambiental de cada mistura, separadamente.

Tabela 21 - % dos componentes de concreto na geração de carga ambiental.

	Misturas		
	Padrão (%)	1 (%)	4 (%)
Agregado graúdo (%)	3,47	3,41	4,3
Agregado miúdo (%)	1,55	1,52	1,92
Cimento (%)	92	92,2	90,6
Água (%)	0	0	0
Transporte (%)	3,65	3,61	3,94

Fonte: o autor.

A Tabela 21 revela que o cimento Portland foi o elemento avaliado que mais contribuiu para o passivo ambiental na produção das três misturas de concreto. Além disso, o transporte dos materiais gerou maior impacto que a extração do agregado miúdo, em todas as misturas e, maior que a extração do agregado graúdo em duas misturas (Padrão e 1). O agregado miúdo foi o elemento que menos gerou impacto ambiental para a produção de concreto, com exceção da água.

A Tabela 22 apresenta as medidas de ACV, nas categorias de impacto avaliadas, e cada material de forma separada. A Tabela mostra que o impacto ambiental gerado na fabricação de concretos é influenciado pela quantidade de material de cada componente presente na massa.

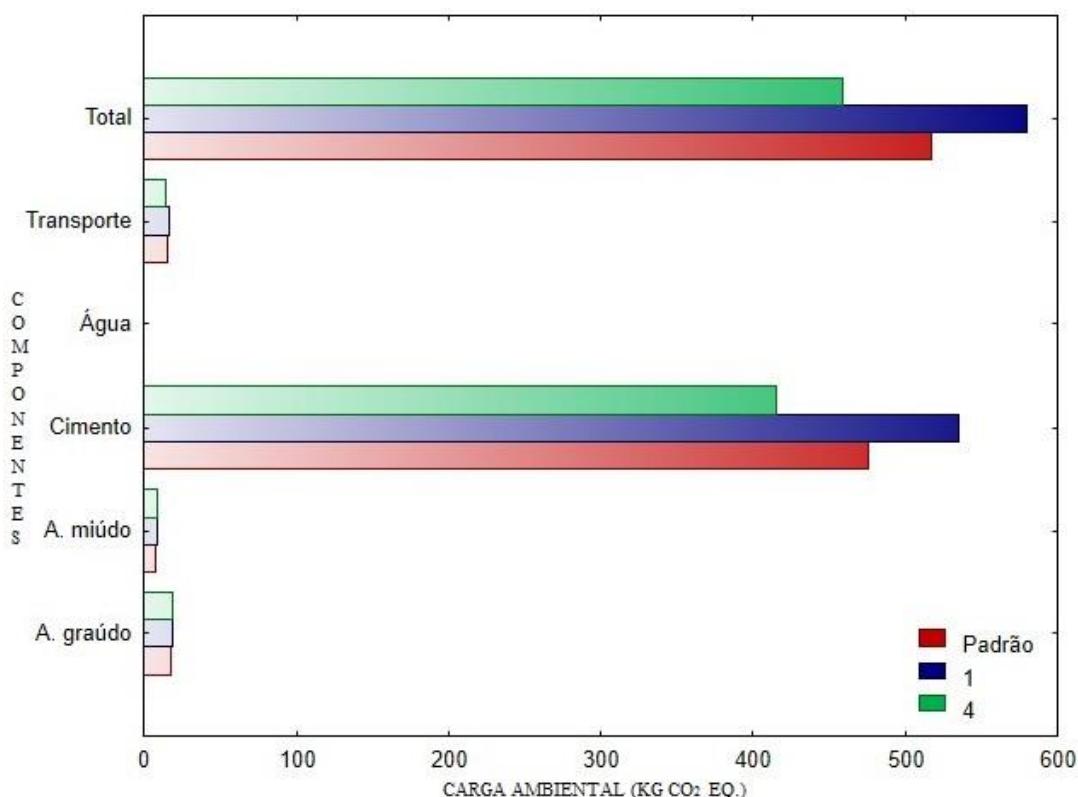
Tabela 22 - Resultados ACV

	Padrão		1		4	
	Mudanças Climáticas (kg CO ₂ eq.)	Depleção Recursos Fósseis (kg óleo eq.)	Mudanças Climáticas (kg CO ₂ eq.)	Depleção Recursos Fósseis (kg óleo eq.)	Mudanças Climáticas (kg CO ₂ eq.)	Depleção Recursos Fósseis (kg óleo eq.)
Agregado graúdo	17,46	5,17	19,27	5,71	19,27	5,71
Agregado miúdo	7,88	2,55	8,70	2,81	8,70	2,82
Cimento	475,19	45,94	534,79	51,70	415,82	40,20
Água	0,12	0,03	0,10	0,03	0,12	0,03
Transporte	15,68	5,89	17,41	12,15	15,01	5,64
Total de impacto	516,33	59,58	580,27	72,40	458,92	54,40

Fonte: o autor

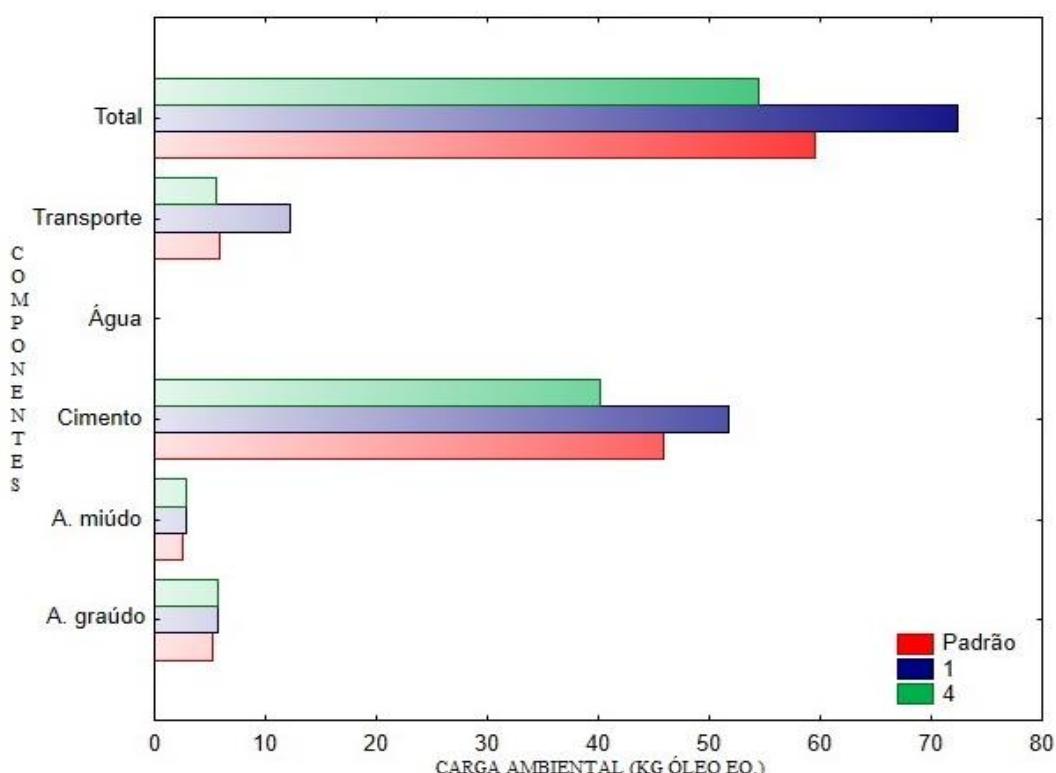
As Figuras 26 e 27 apresentam a análise do ciclo de vida de cada mistura de concreto nas categorias de impacto escolhidas (potencial de aquecimento global e a depleção de recursos naturais finitos – fósseis).

Figura 26 - Gráfico da carga ambiental para a categoria de mudanças climáticas dos componentes das misturas de concreto.



Fonte: o autor.

Figura 27 - Gráfico da carga ambiental para a categoria de depleção de recursos fósseis dos componentes das misturas de concreto.



Fonte: o autor.

As Figuras 26 e 27 mostram a avaliação das categorias de impacto, nas quais é possível verificar que o cimento Portland é o item que mais influenciou na carga ambiental de todas as amostras de concreto estudadas. Além disso, o transporte obteve maior carga ambiental que o agregado miúdo e, em parte, que o agregado graúdo.

Além disso, a mistura 1 foi a que teve a carga ambiental mais elevada para as duas categorias avaliadas, fato explicado pela maior quantidade de cimento Portland da mistura. Dessa forma, quanto maior a quantidade de cimento no traço do concreto composto com os mesmos componentes desta pesquisa, maior será carga ambiental.

Algumas pesquisas estudaram a avaliação do ciclo de vida de concretos e também identificaram o cimento Portland como o componente com maior carga ambiental nos parâmetros avaliados, porém estudou-se os agregados de forma conjunta e não se verificou o impacto do transporte (BORGES *et al.*, 2014). Outro estudo verificou que, ao substituir cimento Portland por cinza volante, está se diminuindo o impacto ambiental na produção de concreto (PASSUELO *et al.*, 2014).

Dessa forma, o presente trabalho contribui para a literatura demonstrando que o teor de cinza volante influenciou nos resultados das amostras que tiveram o rejeito como substituto parcial do cimento Portland, tendo em vista que o cimento foi o item que mais contribuiu para o aumento do impacto. Apesar disso, não foi o único fator responsável pela variação de resultado. Todos os componentes do traço alteraram, de certa forma, o resultado. Entretanto, a quantidade de cimento Portland foi crucial para a obtenção de concretos mais sustentáveis.

Concretos com maior teor de cimento Portland e, consequentemente, maior resistência mecânica tendem a ter uma carga ambiental superior aos concretos com baixos teores de cimento Portland ou menor resistência mecânica. Nesse cenário, a inclusão da cinza volante na massa atua como mantedor de altas resistências mecânicas (como já visto nos resultados deste trabalho) e, ao mesmo tempo, minimizador de impactos ambientais.

8 CONCLUSÕES

O tipo de cinza volante utilizado nesta pesquisa indicou propriedades físicas (com 100 % das partículas inferiores a 36 μm) e químicas adequadas para o uso como material cimentício. Além disso, o material apresentou atividade pozolânica acima do mínimo necessário (cerca de 85 %).

O uso de um planejamento fatorial fracionado possibilitou avaliar simultaneamente os efeitos dos parâmetros água/ligante, agregado/ligante e teor de cinza volante em substituição parcial ao cimento Portland. Ainda por meio da técnica foi possível estimar o efeito dos parâmetros nas principais propriedades do concreto fresco e endurecido após 28 dias de cura.

A trabalhabilidade, por meio do índice de consistência, é influenciada apenas pela relação água/ligante, quaisquer que seja o teor de cinza volante utilizada (dentro dos limites estudados), sendo possível obter concretos com trabalhabilidade adequada para aplicações estruturais. O aumento do teor de cinza volante contribui para a redução da temperatura máxima durante a cura, reduzindo o calor de hidratação.

A resistência à compressão após 28 dias de cura das misturas de concreto foi significativamente influenciada pela relação água/ligante, independentemente do teor de cinza volante (com valores superiores a 30 MPa). Tal fato não foi observado para a resistência à compressão após 60 dias de cura, a qual foi influenciada pela relação água/ligante e teor de cinza. A absorção de água apresentou valores menores em concretos com menor relação água/ligante e maior teor de cinza volante.

Os concretos com cinza volante tiveram menor resistência ao desgaste por abrasão superficial, porém não foi possível constatar a influência da cinza no resultado do ataque de sulfato de sódio. A avaliação do ciclo de vida mostrou que o cimento Portland foi o componente que mais influenciou na carga ambiental das misturas, nas duas categorias de impacto avaliadas. Portanto, concretos com maiores teores de cimento Portland (maior resistência mecânica), possuem carga ambiental superiores a concretos de inferior resistência mecânica. Assim, a cinza volante atua como um mantenedor das altas resistências à compressão e, também, como minimizador do passivo ambiental gerado pelo concreto.

A aplicação de técnicas estatísticas e matemáticas, por meio de modelos de regressão e otimização gráfica, mostrou que é possível obter concretos estruturais com um custo inferior a R\$ 280,00/m³, resistência à compressão após 28 dias de cura superior a 30 MPa e

trabalhabilidade adequada para aplicação na construção civil. Dessa forma, os parâmetros para a produção de concretos possibilitam obter os materiais na categoria de C30 e S100.

A utilização do rejeito de cinza volante em substituição parcial do cimento Portland se mostrou eficaz do ponto de vista técnico, econômico e sustentável, motivando a ampliação, por parte da indústria da construção civil, da sua utilização no mercado como componente de concretos estruturais.

SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Para a realização de trabalhos futuros relativos ao tema debatido, sugere-se:

- Utilizar diferentes tipos de agregados graúdo e miúdo para aplicação em concretos em estudo similar;
- complementação do trabalho por meio de processo de otimização numérica computacional com a utilização de mais variáveis;
- estudo de concretos com cinza volante com foco nas características de durabilidade.

REFERENCIAS

Agência Nacional de Energia Elétrica – ANEEL. **Matriz de Energia Elétrica.** 2017. Disponível em:
[<http://www2.aneel.gov.br/aplicacoes/capacidadebrasil/OperacaoCapacidadeBrasil.cfm>](http://www2.aneel.gov.br/aplicacoes/capacidadebrasil/OperacaoCapacidadeBrasil.cfm)
 Acesso em 10 fev. 2017.

AHMARUZZAMAN, M. A review on the utilization of fly ash. **Progress in energy and Combustion Science.** v. 36, n. 6, p. 327-363, 2010.

ALAKA, Hafiz A.; OYEDELE, Lukumon O.. High Volume Fly Ash Concrete: The Pratical Impacto f Using Superabundant Dose of High Range Water Reducer. **Journal of Building Engineering.** v. 8, n. 1, p. 81-90, 2016. Disponível em:
[<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2352710216302029>](http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2352710216302029). Acesso em 09 mar. 2017.

ALIABDO, Ali A.; ELMOATY, Adb Elmoaty M. Abd Elmoaty; SALEM, Hazem A. Effect of Cement Addition, Solution Resting Time and Curing Characteristics on Fly Ash Based Geopolymer Concrete Performance. **Construction and Building Materials.** v. 123, n. 19, p. 581-593, 2016. Disponível em:
[<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0950061816311424>](http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0950061816311424). Acesso em 25 ago. 2016.

ALMEIDA, I.R., GONCALVES, A.F.; VIEIRA, M. Concreto com cinzas volantes para pavimentação: Estudo da resistência a abrasão e da influência da cura úmida na durabilidade. In: 2º Fórum Interamericano de Pavimentos de Concreto. Associação Brasileira de Cimento Portland, Rio de Janeiro: agosto de 1999. **Anais**, p.239-251.

American Society for Testing And Materials. **ASTM C618:** Standard Specification for Coal Fly Ash and Raw or Calcined Natural Pozzolan for Use in Concrete. West Conshohocken, 2005.

American Society for Testing And Materials. **ASTM C779:** Standard Test Method for Abrasion Resistance of Horizontal Concrete Surface. Pennsylvania, 2012.

American Society for Testing And Materials. **ASTM C1012:** Standard Test Method for Length Change of Hydraulic-Cement Mortars Exposed to a Sulfate Solution. Pennsylvania, 2015.

ARAÚJO, E. C; DIAS, F. M. Massa específica e absorção de água de concretos manufaturados com agregados alternativos. **Revista Ibracon de estruturas e Materiais.** v. 4, n. 5, p. 764-783, 2011.

ARGIZ, C.; MENÉNDEZ, E.; SANJUÁN, M. A.. Efecto de la Adición de Mesclas de Ceniza Volante y Ceniza de Fondo Procedentes del Carbón em la Resistencia Mecánica y Porosidad de Cementos Portland. **Materiales de Construcción.** v. 63, n. 309, p. 49-64, 2013.

Associação Brasileira de Cimento Portland - ABCP. **Guia Básico de Utilização de Cimento Portland** – boletim técnico. São Paulo: ABCP, 2002. Disponível em:

<http://www.abcp.org.br/cms/wp-content/uploads/2016/05/BT106_2003.pdf>. Acesso em 28 jan. 2017.

Associação Brasileira de Normas Técnicas – ABNT. **NBR NM 67.** Concreto: Determinação da Consistência pelo Abatimento do Tronco de Cone. Rio de Janeiro, 1998.

Associação Brasileira de Normas Técnicas - ABNT. **NBR NM 248.** Agregados - Determinação da composição granulométrica. Rio de Janeiro, 2003.

Associação Brasileira de Normas Técnicas - ABNT. **NBR 5732.** Cimento Portland Comum. Rio de Janeiro, 1991a.

Associação Brasileira de Normas Técnicas - ABNT. **NBR 5733.** Cimento Portland de Alta Resistência Inicial. Rio de Janeiro, 1991b.

Associação Brasileira de Normas Técnicas - ABNT. **NBR 5735.** Cimento Portland de Alto-Forno. Rio de Janeiro, 1991c.

Associação Brasileira de Normas Técnicas - ABNT. **NBR 5736.** Cimento Portland Pozolânico. Rio de Janeiro, 1999.

Associação Brasileira de Normas Técnicas - ABNT. **NBR 5737.** Cimentos Portland Resistente a sulfatos. Rio de Janeiro, 1992a.

Associação Brasileira de Normas Técnicas – ABNT. **NBR 5738.** Concreto: Procedimento para Moldagem e Cura de Corpos de Prova. Rio de Janeiro, 2016.

Associação Brasileira de Normas Técnicas – ABNT. **NBR 5752** - Materiais pozolânicos – Determinação da atividade pozolânica com cimento Portland – Índice de atividade pozolânica com o cimento. Rio de Janeiro, 1992b.

Associação Brasileira de Normas Técnicas – ABNT. **NBR 7211.** Agregados para Concreto: Especificação. Rio de Janeiro, 2009c.

Associação Brasileira de Normas Técnicas – ABNT. **NBR 7214:** Areia normal para ensaio de cimento – Especificação. Rio de Janeiro, 2015b.

Associação Brasileira de Normas Técnicas – ABNT. **NBR 8953:** Concreto para fins Estruturais - Classificação pela Massa Específica, por Grupos de Resistência e Consistência, Rio de Janeiro, 2015a.

Associação Brasileira de Normas Técnicas - ABNT. **NBR 9778.** Argamassa e concreto endurecidos - Determinação da absorção de água, índice de vazios e massa específica. Rio de Janeiro, 2005.

Associação Brasileira de Normas Técnicas - ABNT. **NBR 10004.** Resíduos Sólidos – classificação. Rio de Janeiro, 2004.

Associação Brasileira de Normas Técnicas - ABNT. **NBR 11578.** Cimento Portland Composto - Especificação. Rio de Janeiro, 1997.

Associação Brasileira de Normas Técnicas - ABNT. **NBR 12042.** Materiais Inorgânicos – Determinação do desgaste por abrasão. Rio de Janeiro, 2012.

Associação Brasileira de Normas Técnicas. **NBR 12653.** Materiais pozolânicos - Requisitos. Rio de Janeiro, 2014b.

Associação Brasileira de Normas Técnicas - ABNT. **NBR 12655.** Concreto de cimento Portland - Preparo, controle, recebimento e aceitação – Procedimento. Rio de Janeiro, 2015c.

Associação Brasileira de Normas Técnicas - ABNT. **NBR 12989.** Cimento Portland Branco - Especificação. Rio de Janeiro, 1993.

Associação Brasileira de Normas Técnicas - ABNT. **NBR 13116.** Cimento Portland de baixo calor de hidratação - Especificação. Rio de Janeiro, 1994.

Associação brasileira de Normas Técnicas – ABNT. **NBR 15575:** Edificações habitacionais: desempenho. Rio de Janeiro, 2013.

Associação Brasileira de Normas Técnicas - ABNT. **NBR ISO 14040.** Gestão Ambiental – Avaliação do ciclo de vida – princípios e estrutura. Rio de Janeiro, 2014a.

ATIS, Cengiz Duran. Heat evolution of high-volume fly ash concrete. **Cement and Concrete Research.** v. 32, n. 5, p. 751-756, 2002.

BARROS NETO, B.; SCARMINIO, I. E.; BRUNS, R. E. Como fazer experimentos: aplicações na ciência e na indústria. 4. ed. Porto Alegre: Bookman, 2010. 414p.

BATTAGIN, Arnaldo Forti; RODRIGUES, Hugo. Recomendações sobre o uso dos distintos tipos de Cimento Portland nas diferentes aplicações. **Concreto e Construções.** São Paulo. v. 1, n. 73, p. 30–38, 2014

BECK, Sivio Maurício. **Efeitos nas Propriedades Mecânicas, Elásticas e de Deformação em Concretos com Altos Teores de Escória e Cinza Volante.** 2009. 141 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) Centro de Tecnologia. Santa Maria. 2009. Disponível em: <http://cascavel.ufsm.br/tede//tde_busca/arquivo.php?codArquivo=2502>. Acesso em 25 mar. 2017.

BERRY, E. E et al. Hydration in high-volume fly ash concrete binders. **ACI Materials Journal.** v. 91, n. 4, p. 382-389, 1994.

BHATTI, M. A. Practical optimization methods with Mathematica applications. Springer Telos, New York, 2000.

BIERNACKI, J. J.; WILLIAMS, P. J.; STUTZMAN, P. E.. Kinetics of reaction of calcium hidroxide and fly ash. **ACI Materials Journals.** v. 98, n. 4, p. 340-349, 2001.

BRASIL. Lei nº 12.305, de 02 de janeiro de 2010. **Política Nacional de Resíduos Sólidos.** Brasília, 2010. Disponível em: <http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2007-2010/2010/lei/l12305.htm>. Acesso em: 10 mar. 2016.

BRE. **BRE Global Methodology for Environmental Profiles of Construction Products.** BRE: Watford, 2008.

BORGES, Paulo Henrique Ribeiro et al. Estudo comparativo da análise de ciclo de vida de concretos geopoliméricos e de concretos à base de cimento Portland composto (CPII). **Ambiente Construído.** v. 14, n. 2, p. 153-168, 2014.

BRIZOLA, Rodrigo Matzenbacher. **Microestrutura do Cobrimento de Concretos com Altos Teores de Escória e Cinza Volante Ativadas por Cimento Portland E Cal Hidratada.** 2007. 179 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) Centro de Tecnologia. Santa Maria. 2007. Disponível em: <http://cascavel.ufsm.br/tede//tde_busca/arquivo.php?codArquivo=996>. Acesso em 25 mar. 2017.

BROUWERS, H. J. H.; VAN EJK, R. J. Chemical reaction of fly ash. In: 11th International Congress on the Chemistry of Cement (ICCC) p. 791-800. 2003.

BUEST Guilherme Teodoro; SILVA, Narciso G.; CAMPITELI, Vicente Coney. Dosagem de finos em concretos com agregados miúdos e graúdos britados. In: Congresso Brasileiro de Concreto, 47. 2005. São Paulo. **Anais...** São Paulo: Ibracon. 2005. Disponível em: <<http://paginapessoal.utfpr.edu.br/ngsilva/links-2/noticias/ARTIGO %20IBRACON.pdf>>.

BUTTON, S. T. **Metodologia para planejamento experimental e análise de resultados.** Universidade Estadual de Campinas – UNICAMP, 2005.

CAI, Xinhua et al. Abrasion erosion characteristics of concrete made with moderate heat Portland cement, fly ash and silica fume using sandblasting test. **Construction and Building Materials.** v. 127, n. 22, p. 804-814, 2016. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0950061816315677>>. Acesso em 12 fev. 2018

CAMOES, Aires. Betões de Elevado Desempenho com Elevado Volume de Cinzas Volantes. **Engenharia Civil.** v. 10, n. 23, p. 55-64, 2005.

CANTARELLI, Gustavo Martins. **Percolação de Água em Protótipos de Concreto com Elevados Teores de Escória e Cinza Volante com Adição de Cal.** 2007. 107 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) Centro de Tecnologia. Santa Maria. 2007. Disponível em: <http://cascavel.ufsm.br/tede//tde_busca/arquivo.php?codArquivo=1592>. Acesso em 25 mar. 2017.

CESARI, Vanessa Fernandes. **Influencia do Uso de Aditivos e Dispersantes em Pastas de Geopolímeros Produzido com Cinza Volante e Hidróxido de Sódio.** 2015. 128 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) Centro Tecnológico. Florianópolis. 2015. Disponível em:

<<https://repositorio.ufsc.br/bitstream/handle/123456789/135266/334646.pdf?sequence=1>>. Acesso em: 01 mar. 2017

CEZAR, Daiana de Souza. **Características de Durabilidade de Concretos com Cinas Volante e Cinza de Casca de Arroz com e sem Beneficiamento.** 2011. 143 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) Centro de Tecnologia. Santa Maria. 2011.

CHOUSIDIS, N. et al. Effect of fly ash chemical composition on the reinforcement corrosion, thermal diffusion and strength of blended cement concretes. **Construction and Building Materials.** v. 126, n. 11, p. 86-97, 2016.

CIENTEC – Fundação de Ciência e Tecnologia. Metodologia para Determinação de Resistência a Abrasão Superficial de Concreto. 2016.

CORNELL, J. A. **Experiments with mixtures: designs, models and the analysis of mixture data.** New York: John Wiley and Sons, 2002.

DJANIKIAN, J. G. Cimento Portland Pozolânico 320. In: Coletânea de trabalhos sobre pozolanas e cimentos pozolânicos. São Paulo: ABCP, 1981.

FERNÁNDEZ-JIMÉNEZ, A; PALOMO, A. Characterization of Fly Ashes: potential reactivity as alkaline cements. **Fuel.** v. 82, n. 18, p. 2259-2265, 2003.

FERREIRA, Daniela; ANJOS, Marcos dos; BORJA, Edilberto. Influência da Finura da Cinza de Biomassa da Cana-de-açúcar para Obtenção de Pozolana. In: Congresso de Pesquisa e Inovação da Rede Norte Nordeste de Educação Tecnológica. 5. 2010. Maceió. **Anais...** Maceió: IFAL. 2010. p. 1-7. Disponível em: <<http://www.congressos.ifal.edu.br/index.php/connepi/CONNEPI2010/paper/viewFile/1354/903>>. Acesso em 02 mar. 2017.

FERREIRA, Murilo Batista. **Estudo da Carbonatação de Concretos com Diferentes Adições Minerais após 10 anos de Exposição.** 2013. 197 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) Escola de Engenharia. 2013. Disponível em:
<<http://repositorio.bc.ufg.br/tede/handle/tede/3448#preview-link0>>. Acesso em 25 mar. 2017.

FONSECA, Gustavo Celso da. **Adições Minerais e as Disposições Normativas Relativas à Produção de Concreto no Brasil: uma Abordagem Epistêmica.** 2010. 106 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) Escola de Engenharia. Belo Horizonte. 2010. Disponível em: <http://www.bibliotecadigital.ufmg.br/dspace/bitstream/handle/1843/ISMS-8ALHAQ/disserta_o_mestrado_gustavo.pdf?sequence=1>. Acesso em 21 abr. 2017

FRIZZO, Benildo Tocchetto. **Influência do teor e da Finura de pozolanas na permeabilidade ao oxigênio e na absorção capilar do concreto.** 2001. 158 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) Centro de Tecnologia. Universidade Federal de Santa Maria. 2001. Disponível em:
<<http://w3.ufsm.br/gepecon/diss/7f3fa5626126a3a998ce23e75359b532.pdf>>. Acesso em 12 fev. 2018.

FRIZZO, Benildo Tocchetto; ISAÍA, Geraldo Chechella; GASTALDINI, Antônio Luíz Guerra. Influência da finura e de altos teores de pozolana na absorção capilar de água em

concreto estrutural: estudo preliminar. Encontro Nacional de Tecnologia do Ambiente Construído. 9. 2002. P. 1125- 1134. Foz do Iguaçú. **Anais...** Foz do Iguaçú: Infohab. 2002. Disponível em: <http://www.infohab.org.br/entac2014/2002/Artigos/ENTAC2002_1125_1134.pdf>. Acesso em 12 fev. 2018.

FU, X. et al. Studies on blended cement with a large amount of fly ash. **Cement and Concrete Research.** v. 32, n. 7, p. 1153-1159, 2002.

FUNGARO, Denise Alves; SILVA, Magali Guilherme da. Utilização de Zeólita Preparada a partir de Cinza Residuária de Carvão como Adsorvedor de Metais em Água. **Química Nova.** São Paulo, v. 25 n. 6b, p. 1081-1085, 2002. Disponível em <www.Scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0100-404220020000700007>. Acesso em 06 out. 2016.

FUNGARO, Denise Alves; IZIDORO, Juliana de Carvalho; ANDRADE, Anderson Oliveira de. Desenvolvimento Sustentável e o Aproveitamento de Resíduos de Usinas Termelétricas. In: International Workshop: Advances in Cleaner Production. 1. 2007. São Paulo. **Anais...** São Paulo: IPEN, 2007. p. 1-6.

GARCIA, E. et al. Avaliação da Atividade Pozolânica dos Resíduos de Cerâmica Vermelha Produzidos nos Principais Polos Ceramistas do Estado de S. Paulo. **Cerâmica.** v. 61, n. 358, p 251-258, 2015. Disponível em: <<http://www.scielo.br/pdf/ce/v61n358/0366-6913-ce-61-358-00251.pdf>>. Acesso em 02 mar. 2017.

GASQUES, Ana Carla Fernandes. et al. **Revista Tecnológica.** Impactos ambientais dos materiais da construção civil: breve revisão teórica. v. 23, n. 1, p. 13-24, 2014.

GOOGLE MAPS. **Mapa do Brasil.** 2017. Disponível em: <<https://www.google.com.br/maps/place/Brasil/@-16.6806057,-57.740947,5944715m/data=!3m1!1e3!4m5!3m4!1s0x9c59c7ebcc28cf:0x295a1506f2293e63!8m2!3d-14.235004!4d-51.92528>>. Acesso em 28 abr. 2017.

GÜNEYISI, Erhan. et al. Fresh and Rheological Behavior of Nano-Silica and Fly Ash Blended Self-Compacting Concrete. **Construction and Building Materials.** v. 95, n. 1, 2015, p. 29-44. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0950061815301458>>. Acesso em 09 mar. 2017.

HANEHARA, S. et al. Effects of water/poder ratio, mixing ratio of fly ash, and curing temperature on pozzolanic reaction of fly ash in cement paste. **Cement and Concrete Research.** v. 31, n. 1, p. 1073-1077. 2001.

HEMALATHA, T.; RAMASWAMY, Ananth. A Review on Fly Ash Characteristics – Towards Promoting High Volume Utilization in Developing Sustainable Concrete. **Journal of Cleaner Production.** v. 147, n. 1, p. 546-559, 2017. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0959652617301294>>. Acesso em 02 mar. 2017.

HINRICHES, Roger A.; KLEINBACH, Merlin; REIS, Lineu Belico dos. **Energia e Meio Ambiente**. 2 ed. São Paulo: Cengage Learning, 2010.

HOPPE FILHO, J. et al. Ataque de Matrizes Cimentícias por Sulfato de Sódio: Adições Minerais como Agentes Mitigadores. **Cerâmica**. v. 61, n. 358, p. 168-178, 2015. Disponível em: <<http://www.scielo.br/pdf/ce/v61n358/0366-6913-ce-61-358-00168.pdf>>. Acesso em 18 mar. 2017.

HOPPE FILHO, Juarez. Sistemas Cimento, Cinza Volante e Cal Hidratada: Mecanismo de Hidratação, Micoestrutura e Carbonatação de Concreto. Tese (Doutorado em Engenharia) Universidade de São Paulo (USP). São Paulo. 2008.

HORNAIN, H.; MIERSMAN, F.L.; MARCHAND, J. Influence of Residual Carbon in Fly Ash on Microstructure and Strength Development of Mortars and Concretes. **ACI**, v. 132, p. 21-36, 1992. Disponível em:
<<https://www.concrete.org/publications/internationalconcreteabstractsportal.aspx?m=details&ID=1920>>. Acesso em 16 mar. 2017.

HUNTZINGER, D. N.; EATMON, T. D. A life-Cycle Assessment of Portland Cement Manufacturing: comparing the traditional process with alternative technologies. **Journal of Cleaner Production**, v. 17, n. 7, p. 668-675, 2009.

ISAIA, Geraldo Cechella. **Materiais de Construção Civil e Princípios de Ciência e Engenharia de Materiais**. São Paulo: IBRACON, 2007. 2v.

ISAIA, G. I.; GASTALDINI, A. L. G.. Sustentabilidade do Concreto com Altos Teores de Escória e Cinzas Volantes. **Revista IBRACON de Estruturas e Materiais**. v. 2, n.3, p. 244 – 253, 2009.

JOHN, V. M. Textos técnicos: **A construção e o Meio Ambiente**. Tutorial que caracteriza o impacto ambiental da construção civil e demonstra a importância da reciclagem de resíduos como materiais de construção civil, constituindo uma forma de redução e controle desse impacto. Disponível em: <http://www.reciclagem.pcc.usp.br/a_construcao_e.htm> Acesso em 23 agosto 2017.

JUNCKES, Ricardo. **Influência da adição de cinza volante na elevação da temperatura de concretos aplicados em blocos de fundação**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) UFSC 2015. 164 p.

KANNAN, V.; GANESAN, K.; Mechanical Properties of Self-Compacting Concrete With Binary and Ternary Cementitious Blends f Metakaolin and Fly Ash. **Journal of the South African Institution of Civil Engineering**. v. 56, n. 56, p. 97-105, 2014.

KASHANI, A. et al. Modelling the Yield Stress of Ternary Cement-slag-fly Ash Pastes Based on Particle Size Distribution. **Powder Technology**. v. 266, n. 11, p 203-209, 2014. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0032591014005853>>. Acesso em 02 mar. 2017.

KOBAYAKAWA, M. et al. Pozzolanic reaction of fly ash in cement paste system. In: 11th International Congress on the Chemistry of Cement (ICCC). p. 1152-1154, 2003.

KOOLIVAND, Ali. et al. Hazardous and Industrial Waste Composition and Associated Management Activities in Caspian Industrial Park, Iran. **Environmental Nanotechnology, Monitoring & Management.** v. 7, n. 5, p. 9-14, 2017. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2215153216301064>>. Acesso em 22 abr. 2017.

KOSMATKA, S. H.; PARANESE, W. C. Design and control Concrete Mixtures. 3rd ed., United States: Portland Cement Association, 205p. 1994.

KOSTOVA, Irena. et al. Mineralogy, Geochemistry and Mercury Content Characterization af Fly Ashes from Maritsa 3 and Varna Thermoelectric Power Plants, Bulgaria. **Fuel.** v. 186, n. 24, p. 674-684, 2016. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0016236116308717>>. Acesso em 22 abr. 2017.

KOVLER, Konstantin; ROUSSEL, Nicolas. Properties of Fresh and Hardened Concrete. **Cement and Concrete Research.** v. 41, n. 7, p. 775-792, 2011. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0008884611000858>>. Acesso em: 09 mar. 2017

KUMAR, Rakesh. Influence of Recycled Coarse Agregate Derived From Construction and Demolition Waste (CDW) on Abrasion Resistance of Pavement Concrete. **Construction and Biulding Materials.** v. 124, n. 11, p. 248-255, 2017. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S095006181730449X>>. Acesso em 18 mar. 2017.

KURDA, Rawaz; BRITO, Jorge de; SILVESTRE, José D.. Influence of recycled aggregates and high contentes of fly ash o concrete fresh properties. **Cement and Concrete Composites.** v. 84, n. 11, p. 198-213, 2017. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0958946517302457>>.

LAWRENCE Philippe; CYR, Martin; RINGOT, Erick. Mineral admixtures in mortars effect of type, amount and fineness of fine constituents on compressive strength. **Cement and Concrete Research.** v. 35, n. 6, p. 1092-1105, 2005. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0008884604003126>>.

LIMA, J.A.R. **Avaliação das consequências da produção de concreto no Brasil para as mudanças climáticas.** 2010. 151 f. Tese (Doutorado em Engenharia). Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. São Paulo, 2010. Disponível em: <www.teses.usp.br/teses/disponiveis/3/3146/tde.../Tese_Jose_Antonio_Ribeiro_Lima.pdf>. Acesso em: 29 jan. 2017.

MASSAZZA, F. Pozzolana and pozzolanic cements. In: Lea's chemestry of cement and concrete. Edited by Peter C. Hewlett. Ath ed., 1998.

MA, Chau-Khun. et al. Repair and Rehabilitation of Concrete Structures Using Confinement: A Review. **Construction and Building Materials.** v. 133, n. 4, p. 502-515, 2017. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0950061816320190>>. Acesso em 25 mar. 2017.

MALEK, R. I. et al. The contribution of class-F fly ash to strength of cementitious mixtures. **Cement and Concrete Research.** v. 35, n. 6, p. 1152-1154, 2005.

MEDEIROS JUNIOR, Ronaldo Alves de; LIMA, Maryangela Geimba de; BALESTRA, Carlos Eduardo Tino. Identificação das Principais Manifestações Patológicas em Estruturas de Concreto Armado Pertencentes ao DCTA. In: Congresso Internacional sobre Patologia e Reparação de Estruturas. 9. 2013. João Pessoa. **Anais...** João Pessoa: IFPB. p. 1 – 9.

MEHTA, P. Kumar; MONTEIRO, Paulo J.M.. **Concreto:** Microestrutura, propriedades e materiais. 2. ed. São Paulo: IBRACON, 2014.

MEYER, C. The greening of the concrete industry. **Cement and Concrete Composites.** v. 31, n. 8, p. 601-605, 2009. Disponível em <www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0958946509000031>. Acesso em 13 out. 2016.

MENDES, Natalia Crespo; BUENO, Cristiane; OMETTO; Aldo Roberto. Avaliação de Impacto do Ciclo de Vida: revisão dos principais métodos. **Prod..** v.26, n.1, p.160-175, 2016.

MODESTO, Rivana B. et al. Estudo Mineralógico de Carvão e Cinzas Volantes de Usinas Termelétricas: Prevenção de Depósitos de Recuperação. In: Simpósio Internacional de Qualidade Ambiental. 9. 2014, Porto Alegre. **Anais...** Porto Alegre: ABES, 2014. p 1–11.

MONTGOMERY D. C.. Design and analysis of experiments. 3. Ed. John Wiley and Sons, 1991.

NARDI, José Vidal. **Delineamento e otimização de misturas pozolânicas.** Tese (Doutorado em Ciência e Engenharia de Materiais) UFSC 2004 112 p.

NEVILLE, A. M.; BROOKS, J. J.. **Tecnologia do Concreto.** 2 ed. São Paulo: BOOKMAN, 2013.

NILI, Mahmoud; SALEHI, A. M. Assessing the effectiveness of pozzolans in massive high-strength concrete. **Construction and Building Materials.** 2010.

NOGUEIRA, Josiane Ramos. **Reciclando Cinzas:** Estudo de Viabilidade para produção de Blocos para a Construção Civil a partir da Cinza Volante Residual de um Reator de Leito Fluidizado. 2011. 169 f. Dissertação (Mestrado em Arquitetura e Urbanismo) Instituto de Arquitetura e Urbanismo de São Carlos. São Carlos. 2011.

OLIVEIRA, Marilia P. de; BARBOSA, Normando P.. Potencialidades de um Caulim Calcinado como Material de Substituição Parcial do Cimento Portland em Argamassas. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental,** Campina Grande. v. 10, n. 2, p. 490-496, 2006 . Disponível em:

<http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1415-43662006000200034&lng=en&nrm=iso>. Acesso em 27 fev. 2017.

OLIVEIRA, Andrielli Morais de. Avaliação do Desempenho de Concretos com Adições Minerais Quanto a Corrosão das Armaduras Induzida por Cloretos. 2007. 276 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) Escola de Engenharia. Goiânia. 2007. Disponível em: <<http://repositorio.bc.ufg.br/tede/handle/tde/673>>. Acesso em 25 mar. 2017.

PADILHA JUNIOR; Marcos Antônio. et al. Estado da Arte do Estudo do Ataque por Sulfatos em Concretos: Avaliação de Ensaios Acelerados Versus Ensaios de Campo. In: Congresso Técnico e Científico de Engenharia e da Agronomia. 1. 2015. **Anais...** Fortaleza: CONFEA. 2015. p. 1–4. Disponível em: <http://www.confea.org.br/media/Civil_estado_da_arte_do_estudo_do_ataque_por_sulfatos_em_concretos_%E2%80%93_avaliacao_de_ensaio_s_acelerados_versus_ensaios_de_campo.pdf>. Acesso em 08 mar. 2017.

PANDEY, Shikha Kumari; BHATTACHARYA, Tanushree. Mobility, Ecological risk and Change in Surface Morphology During Sequential Chemical Extraction of Heavy Metals in Fly Ash: a Case Study. **Environmental Technology & Innovation.** v. 6, n. 1, 2016. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2352186416300979>>. Acesso em 01 mar. 2017.

PANESAR, D.K.; SHINDMAN, B. The Effect of Segregation on Transport and Durability Properties of Self Consolidating Concrete. **Cement and Concrete Research.** v. 42, n. 2, p. 252-264, 2012. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0008884611002560>>. Acesso em 02 mar. 2017.

PARK, Junghoon; TAE, Sungho; TAEHYUNG, Kim. **Renewable ans Sustainable Energy Reviews.** v. 16, n. 5, p. 2940-2946, 2012.

PASSUELLO, Ana Carolina Badalotti. et al. Aplicação da Avaliação de Ciclo de Vida na análise de impactos ambientais de materiais de construção inovadores: estudo de caso da pegada de carbono de clínqueres alternativos. **Ambiente Construído.** v.14, n.4. p 7-20, 2014.

PATRICIO, S.M.R. et al. Blocos solo-cal utilizando resíduo da construção civil. **Cerâmica.** v. 59, n. 349, p. 27-33, 2013.

PAULA, L. G. Análise Termoeconômica do Processo de Produção de Cimento Portland Com Co-Processamento de Misturas de Resíduos. 158 f. Itajubá, 2009. Dissertação (Mestrado em Conversão de Energia) – Instituto de Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Itajubá, Itajubá, 2009.

PCZIECZEK, Adriane. **Análise das propriedades físicas e mecânicas de argamassa para revestimento utilizando cinza volante e resíduos de borracha de pneus inservíveis.** 2017. 141 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) Centro de Ciências Tecnológicas. Joinville. 2017. Disponível em: <http://cct.udesc.br/arquivos/id_submenu/2321/adriane_pczieczek.pdf>. Acesso em 02.02.2018.

PEDROSO, Fábio Luís. Concreto: as Origens e a Evolução do Material Construtivo mais Usado pelo Homem. **Concreto e Construções**. v. 37, n. 53, p. 14-19, 2009. Disponível em: <http://ibracon.org.br/publicacoes/revistas_ibracon/rev_construcao/pdf/Revista_Concreto_53.pdf>. Acesso em 22 abr. 2017.

PEREIRA, Viviane Camejo; ALMEIDA, Jalcione. Relações entre a Atividade Carbonífera e o Rural em Candiota, RS, Brasil: análises sobre representações sociais em um contexto de dilemas sobre a energia. **Revista de Economia e Sociologia Rural**. v. 53, n. 1, p. 127-142, 2015.

PETRY, Simone Bassan. **Estudo da Permeabilidade à Água na Camada de Cobrimento de Protótipos de Concretos com Altos Teores de Cinza Volante**. 2004. 111 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil). Centro de Tecnologia. Santa Maria. 2004. Disponível em: <http://cascavel.ufsm.br/tede//tde_busca/arquivo.php?codArquivo=1642>. Acesso em 25 mar. 2017

PICHLER, Ch.; RÖCK, R.; LACKNER, R. Apparent Power-law Fluid Behavior of Vibrated Fresh Concrete: Engineering Arguments Based on Stokes-type Sphere Viscometer Measurements. **Journal of Newtonian Fluid Mechanics**. v. 240, n. 1, p. 44-55, 2017

PIRES, Plínio Ferreira. **Estudo da Carbonatação Avançada em Concretos Contendo Adições Minerais**. 2016. 141 f. Dissertação (Mestrado em Geotecnia, Estruturas e Construção Civil) 2016. Disponível em: <<http://repositorio.bc.ufg.br/tede/handle/tede/6319>>. Acesso em: 25 mar. 2017.

POSSAN, Edna; VENQUIARUTO, Simone Dorneles; DAL MOLIN, Denise Coutinho Carpena. Estudo da durabilidade de concretos com adição de cinza volante via metodologia de superfície de resposta. **Revista Eletrônica Científica Inovação e Tecnologia**. v. 1, n. 4, 2011.

POZZOBON, Cristina E. **Aplicações Tecnológicas para a cinza do carvão mineral produzida no complexo termelétrico Jorge Lacerda**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) UFSC, 1999.141 p.

POZZOBON, Cristina E.; ROCHA, Janaíde C.; CHERIAF, Malik. **Cinza do carvão mineral produzida no complexo termelétrico Jorge Lacerda**: contexto comercial ENTAC 2000 p. 665- 673

PRÉ-CONSULTANTS. SIMAPRO. ACV Data analysis system. Version 8. 2014.

PUGLIESI, Nataly, **Cimento**: diferentes tipos e aplicações. 2016. Disponível em: <http://www.aecweb.com.brcont/m/rev/cimentodiferentestiposeaplicacoes_11959_01>. Acesso em 01 dez. 2016

PULIDO, John Cárdenas; LIZARAZO-MARRIAGA, Juan; CHAPARRO, William Aperador. Comportamiento Mecánico de Sistemas Cementantes Binarios (Cemento Portland – Ceniza Volante – Escoria de Alto Horno). **Revista Latinoamericana de Metalurgia y Materiales**. v. 36, n. 1, p. 78-98, 2015.

RAKHIMOV, Ravil Z. et al. Properties of Portland Cement Pastes Enriched with Addition of Calcined Marl. **Journal of Building Engineering**. v. 11, n. 3, p. 30-36, 2017. Disponível em:

<<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2352710216303394>>. Acesso em 22 abr. 2017.

RAO, S. Krishna; SRAVANA, P.; RAO, T. Chandrasekhar. Abrasion Resistance and Mechanical Properties of Roller Compacted Concrete with GGBS. **Construction and Building Materials.** v. 114, n. 13, p. 925-233, 2016. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0950061816305360>>. Acesso em 21 abr. 2017.

RECENA, Fernando Antônio Piazza. **Método de Dosagem de Concreto pelo Volume de Pasta Com Emprego de Cinza Volante.** 2011. 263 f. Tese (Doutorado em Engenharia Civil). Escola de Engenharia. Porto Alegre. 2011. Disponível em: <<http://www.lume.ufrgs.br/handle/10183/36331>>. Acesso em 10 jan. 2017.

REIS, Rui Jorge Alves da Cunha. **Betões Eco-Eficientes com Cinzas E Metacaulino.** 2009. 160 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil). Escola de Engenharia. Braga. 2009.

REIS, Lineu Belico dos. **Geração de Energia Elétrica.** 2 ed. São Paulo: Manole, 2011.

RODRIGUES, Maria Paulina Santos Forte de Faria. **Argamassas de Revestimentos Para Alvenarias Antigas.** 2004. 523 f. Tese (Doutorado em Engenharia Civil). Faculdade de Ciências e Tecnologia. Lisboa. 2004. Disponível em: <https://run.unl.pt/bitstream/10362/1129/3/faria_2004.pdf>. Acesso em 29 abr. 2017.

ROSSI, Efigênia; SALES, Almir. Metodologia para análise da avaliação do ciclo de vida da pedra britada utilizada em concretos. XIV Encontro nacional de tecnologia do ambiente construído. Juiz de Fora. 2012. Disponível em: <<http://www.infohab.org.br/entac2014/2012/docs/1010.pdf>>. Acesso em 1 ago. 2017.

ROUSSEL, Nicolas. et al. Steady State Flow of Cement Suspensions: A Micromechanical State of the Art. **Cement and Concrete Research.** v. 40, n. 1, p. 77-84, 2010. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0008884609002385>>. Acesso em 07 mar. 2017.

SAADE, Marcella R. M.; SILVA, Maristela G.; GOMES; Vanessa. A avaliação do ciclo de vida – ACV, e a etapa de avaliação de impactos ambientais: considerações sobre o uso de diferentes métodos e seus reflexos nos resultados finais. **Natureza on-line.** v. 12, n. 3, p. 109-116, 2014.

SABEDOT, Sidney. et al. Caracterização e Aproveitamento de Cinzas da Combustão de Carvão Mineral geradas em Usinas Termelétricas. In: Congresso Brasileiro de Carvão Mineral. 3. 2011. Porto Alegre. **Anais...** Porto Alegre: Rede Carvão, 2011. p. 1 – 15.

SACILOTO, Adriano Pedroso. **Comportamento Frente à Ação de Cloretos de Concretos Compostos com Adições Minerais Submetidos a Diferentes Períodos de Cura.** 2005 90 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil). Centro de Ciências Rurais. Santa Maria. 2005. Disponível em: <http://cascavel.ufsm.br/tede//tde_busca/arquivo.php?codArquivo=346>. Acesso em 25 mar. 2017.

SALUM, Paula de Lima. **Efeito da elevação de temperatura sobre a resistência à compressão de concretos massa com diferentes teores de cinza volante.** Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) Centro Tecnológico. 2016. Florianópolis.

SANTHANAM, Manu; COHEN, Menashi D.; OLEK, Jan. Mechanism of sulfate attack: a fresh look Part 1. Summary of experimental results. **Cement and Concrete Research**, n. 32, p. 915-921, 2002.

SCHACKOW, Adilson. **Efeito das Características Pozolânicas de Rejeitos de Tijolos nas Propriedades de Argamassas.** Tese (Doutorado em Ciência e Engenharia de Materiais). Centro de Ciências Tecnológicas – CCT. 2015. Joinville.

SCHWAAB, Samoel. **Efeito da Adição de Aditivo Plastificante Retardador de Pega nas Propriedades de Concretos Usinados de Cimento Portland Usando Planejamento Fatorial.** Dissertação (Mestrado em Ciência e Engenharia de Materiais) Centro de Ciências Tecnológicas – CCT. 2015. Joinville. Disponível em: <<http://www.tede.udesc.br/bitstream/handle/1676/1/Samoel%20Schwaab.pdf>>. Acesso em 22 abr. 2017.

SHEN, Weiguo. et al. Mixing Design and Microstructure of Ultra High Strength Concrete with Manufactured Sand. **Construction and Building Materials.** v. 143, n. 14, p. 312-321, 2017. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0950061817304609>>. Acesso em 22 abr. 2017.

SIQUEIRA, J.S.; SOUZA, C. A. G.; SOUZA, J. A. S.. Reaproveitamento de Cinzas de Carvão Mineral na Formulação de Argamassas. **Cerâmica.** v. 58, p. 275-279, 2012.

SILVA, J. A. et al. Influência das variáveis nitrogênio, fósforo e brix na produção dos metabólitos secundários contaminantes totais da fermentação alcoólica. **Química Nova.** 2006. 29, 695.

SILVA, Cristina Vitorino da. **Contribuição ao Estudo do Desgaste Superficial por Abrasão em Concretos Empregados em Pisos.** 2011. 181 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil). Escola de Engenharia. Porto Alegre. 2011. Disponível em: <<http://www.lume.ufrgs.br/handle/10183/32017>>. Acesso em 01 dez. 2016.

SILVEIRA, Adriana Augustin. **A Utilização de Cinza de Casca de Arroz com Vistas a Durabilidade de Concretos: Estudo do Ataque por Sulfatos.** 1996. 155 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia) Escola de Engenharia. Porto Alegre. 1996.

SILVEIRA, Rodrigo Goettems. **Estudo da microestrutura da camada de cobrimento de concreto com altos teores de cinza volante.** 2004. 163f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) Escola de Engenharia. Santa Maria. 2004.

Sindicato Nacional da Indústria do Cimento – SNIC. **Produção Nacional de Cimento por Regiões e Estados (t).** 2017. Disponível em: <<http://www.snic.org.br/numeros/numeros.asp?path=ProducaoRegional2016.gif>>. Acesso em 22 abr. 2017.

SINDICATO NACIONAL DA INDÚSTRIA DO CIMENTO. **Relatório Anual 2010.** 2011. Disponível em: <http://www.snic.org.br/pdf/snic-relatorio2010-11_web.pdf>. Acesso em: 21 jan. 2017.

Sistema Nacional de Pesquisa de Custos e Índices da Construção Civil – SINAPI. **Referencial de Preços (01/2017) – SC.** 2017. Disponível em: <<http://www.caixa.gov.br/poder-publico/apoio-poder-publico/sinapi/Paginas/default.Asp>>. Acesso em 10 fev. 2017.

SMARTTECH, Impactlog: data transfer software system. 2010.

SOARES, Edgar. *et al.* Desempenho mecânico de Alvenaria de BTC estabilizados através de ativação alcalina de cinzas volantes In: Congresso Nacional de Geotecnica, 15. 2016. Porto. **Anais...** Porto. Sociedade Portuguesa de Geotecnica, 2016. p. 1-12.

SOMBRIÓ, Catarina Raquel Naves. ACV de painéis de blocos cerâmicos e concreto armado: um exercício de aplicação do manual do ILCD. 2015. 138 f. Dissertação (Mestrado em Arquitetura e Urbanismo) Brasília. 2015.

SOUZA, Ariane de; SALES, Almir. Inventário do ciclo de vida da areia extraída m leito de rio. **VII Congresso Nacional de Excelência em Gestão.** 2012. Disponível em: <<http://www.inovarse.org/filebrowser/download/15824>>. Acesso em 13 ago. 2017

STATSOFT, Inc. STATISTICA: data analysis software system. Version 7. 2007.

SUA-IAN, Gritsada; MAKUL, Natt. Utilization of coal- and biomass-fires ash in the production of self-consolidating concrete: a literature review. **Journal of Cleaner Production.** v. 100. n. 15. p. 59-76, 2015. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0959652615002565>>. Acesso em 21 abr. 2017.

SUSHIL, Snigdha; BATRA, Vidya. Analysis of Fly Ash Heavy Metal Content and Disposal Thermal Power Plants in India. **Fuel.** v. 85. n. 12. p. 2676-2679, 2006. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0016236106001529>>. Acesso em 01. mar. 2017

TASCA, Maisson. **Estudo da Carbonatação Natural de Concretos com Pozolanas: Monitoramento em Longo Prazo e Análise da Microestrutura.** 2012. 179 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) Centro de Tecnologia. Santa Maria. 2012. Disponível em: <http://cascavel.ufsm.br/tede//tde_busca/arquivo.php?codArquivo=5183>. Acesso em 25 mar. 2017.

TUTIKIAN, Bernardo Fonseca; DAL MOLIN, Denise Carpêna Coitinho. Comparativo das Propriedades do Concreto Auto-adensável utilizando areia fina e cinza volante. **Revista Ibracon de Estruturas e Materiais.** v. 4, n. 2, p. 247–276, 2011.

- UCHIKAWA, H. Effect of blending componentes on hydration and structure formation. In: 8th International Congress on the Chemistry of Cement (ICCC). v. 1, p. 249-280, 1986.
- VALDERRAMA, C. *et al.* Implementation of Best Available Techniques in Cement Manufacturing: a life-cycle assessment study. **Journal of Cleaner Production**, v. 25, n. 3, p. 60-67, 2011.
- VIANCHÁ, Cláudia Gil; ROLDAN, Ricardo Plazas. **Propuesta para la utilización de cenizas volantes como adición en la fabricación de cemento tipo I en la planta cementera de Holcim Colombia S.A.** 2007. 52 f. Monografia (Especialização em Gerencia de Produção e Operação). Bogotá. 2007.
- VOTORAN. **Cimento CP II-Z.** Boletim Técnico. 2016.
- WANG, A.; ZHANG, C.; SUN, W.. Fly ash effects: II. The active effect of fly ash. **Cement and Concrete Research**. v. 34, n. 11, p. 2057-2060, 2004.
- WANG, JingJing. et al. Life cycle sustainability assessment of fly ash concrete structures. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**. v. 80, n. 12, p. 1162-1174, 2017.
- WCZW'LIC, W. N. Heat evolution in hydrated cementitious systems admixture with fly ash. **Journal of Thermal Analysis and Calorimetry**. v. 65, n. 2, p. 613-619, 2001.
- WITZKE, Franky Bruno. et al. Cost and property optimisation of concretes containing fly ash using mathematical and statistical strategies. International Symposium on Materials an International Conference, 8. 2017. Aveiro. **Anais...** Aveiro: SPM. 2017.
- WORLD COAL ASSOCIATION. **Coal facts 2015.** 2015. Disponível em: <http://www.worldcoal.org/file_validate.php?file=Coal%20Facts%202015.pdf>. Acesso em 15 set. 2016.
- ZANCHETA, Márcio Nestor; MELDONIAN, Nelson Leon; POLI, Dora de Castro Rubio. Uma Análise dos Impactos Ambientais da Usina Termoelétrica de Piratinga, em Comparação aos Gerados pela Usina Angra I. In: International Atlantic Nuclear Conference, 2005, Santos. **Anais...** Santos: ABEN, 2005. p. 1-8.
- ZHANG, Jinrui. et al. External Sulfate Attack to Reinforced Concrete Under Drying-wetting Cycles and Loading Condition: Numerical Simulation and Experimental Validation by Ultrasonic Array Method. **Construction and Building Materials**. v. 139, n.10, p. 365-373, 2017. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0950061817302544>>. Acesso em 18 mar. 2017
- XIE, Z.; XI, Y. Hardening Mechanism of an Alkaline-Activated Class F Fly Ash. **Cement and Concrete Research**. v. 31, n. 9, p. 1245-1249, 2001.