

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA  
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL  
PPGEC**

**ESTUDO DE CONCRETOS AUTOADENSÁVEIS COM  
ELEVADOS TEORES DE CINZA VOLANTE PARA USO EM  
GRANDES BLOCOS DE FUNDAÇÃO**

Maiara Foiato

Florianópolis  
2017



**UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA  
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL  
PPGEC**

**ESTUDO DE CONCRETOS AUTOADENSÁVEIS COM  
ELEVADOS TEORES DE CINZA VOLANTE PARA USO EM  
GRANDES BLOCOS DE FUNDAÇÃO**

Maiara Foiato

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil – PPGEC, da Universidade Federal de Santa Catarina, como requisito parcial para obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil.  
Orientador: Prof. Luiz Roberto Prudêncio Júnior, Dr.

Florianópolis  
2017

Ficha de identificação da obra elaborada pelo autor,  
através do Programa de Geração Automática da Biblioteca Universitária da UFSC.

Foiato, Maiara

ESTUDO DE CONCRETOS AUTOADENSÁVEIS COM ELEVADOS  
TEORES DE CINZA VOLANTE PARA USO EM GRANDES BLOCOS  
DE FUNDAÇÃO / Maiara Foiato ; orientador, Luiz  
Roberto Prudêncio Júnior, 2017.  
217 p.

Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de  
Santa Catarina, Centro Tecnológico, Programa de Pós  
Graduação em Engenharia Civil, Florianópolis, 2017.

Inclui referências.

1. Engenharia Civil. 2. bloco de fundação. 3.  
cinza volante. 4. concretos autoadensáveis. I.  
Prudêncio Júnior, Luiz Roberto . II. Universidade  
Federal de Santa Catarina. Programa de Pós-Graduação  
em Engenharia Civil. III. Título.

Maiara Foiato

**ESTUDO DE CONCRETOS AUTOADENSÁVEIS COM  
ELEVADOS TEORES DE CINZA VOLANTE PARA USO EM  
GRANDES BLOCOS DE FUNDAÇÃO**

Esta Dissertação foi julgada adequada para obtenção do Título de “mestre”, e aprovada em sua forma final pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil.

Florianópolis, 03 de maio de 2017.

---

Prof. Glicério Trichês, Dr.  
Coordenador do Curso

---

Prof. Luiz Roberto Prudêncio Jr, Dr.  
Orientador  
Universidade Federal de Santa Catarina

**Banca Examinadora:**

---

Prof. Oswaldo Cascudo, Dr.  
Universidade Federal de Goiás (videoconferência)

---

Prof. Alexandre Lima de Oliveira, Dr.  
Instituto Federal de Santa Catarina

---

Prof. Fernando Pelisser, Dr.  
Universidade Federal de Santa Catarina



## AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus, por ter permitido que eu chegasse até aqui e por ter guiado meus caminhos.

Agradeço à minha família, especialmente aos meus pais e irmãs, pelo apoio incondicional e por acreditarem nas minhas escolhas. Ainda, agradeço em especial à minha mãe pois, desde o dia em que mudei de cidade para iniciar meus estudos, dedica suas orações para que eu alcance meus objetivos. Aos meus sobrinhos e sobrinhas que, mesmo à distância, alegam minha vida com suas façanhas. Ao meu namorado Luciano, por todas as noites, sábados, domingos e feriados disponibilizados para me ajudar na execução dos concretos, não apenas com esforço físico, mas com todo seu bom humor e calma, e, principalmente pelo seu apoio de sempre.

Especialmente, agradeço ao professor Luiz Roberto Prudêncio Jr., pela sua excelente orientação, por esclarecer minhas dúvidas sempre de maneira clara e objetiva, por me atender e me acalmar nos momentos de desespero e por dividir seus conhecimentos. Certamente é um exemplo de pessoa e profissional a ser seguido.

Às colegas de trabalho e sobretudo amigas, Jhulis e Gislaine, pelo auxílio na execução dos ensaios e, principalmente, por ouvirem minhas lamúrias me incentivando sempre a continuar nesta, que foi uma longa caminhada. À Unoesc, especialmente à Coordenadora do Curso de Engenharia Civil, professora Angela, por acreditar no meu trabalho. Aos estagiários do Laboratório de Materiais da Unoesc pela ajuda na execução dos ensaios.

Ao pessoal do GTec, por terem me recebido muito bem no pequeno período em que estive com eles, em particular ao Eduardo Graeff, pela enorme ajuda com o ensaio de calorimetria. Agradeço também ao André, ao Alex e ao Lucas.

Agradeço à GRACE e ao Engenheiro Denis Weidmann, pela doação do aditivo superplastificante. À Pedreira Triângulo e ao Engenheiro Rudi, pela doação dos agregados basálticos. À Maxmohr e à Engemix, pela doação das amostras de cinza volante. Ao colega de mestrado Rennan Medeiros, pelo fornecimento da cinza volante moída. À Metacaulim do Brasil e ao Sr. Neto Bittencourt, pela doação do metacaulim.

Aos professores Alexandre Lima de Oliveira e Fernando Pelisser, pelas contribuições no exame de qualificação.

À secretaria do PPGEC, especialmente à Priscila, pela atenção e simpatia com que sempre me atendeu.

Agradeço a minha prima Jana, que por inúmeras vezes me deu abrigo em sua casa, tornando minhas viagens semanais menos cansativas e mais seguras.

Enfim, agradeço a todos que contribuíram de alguma maneira para que este trabalho fosse concluído e para que meu objetivo fosse alcançado.

## RESUMO

A opção pela execução de edificações altas está em destaque no Brasil, especialmente no litoral do estado de Santa Catarina. Nestes empreendimentos imobiliários, normalmente, ocorre a utilização de elevados volumes de concreto, principalmente nos grandes blocos de fundação. O material empregado nestes elementos estruturais pode ser caracterizado como concreto massa onde a ocorrência de tensões térmicas que podem levar à fissuração das peças deve ser evitada. Dentre as possibilidades para reduzir a geração de calor no concreto, destaca-se a redução do consumo de cimento através da substituição deste ligante por altos volumes de cinza volante. Concretos com esta configuração são denominados de concretos com elevados teores de cinza volante, onde a substituição do cimento ocorre em torno de 50%. Outra característica comumente presente nos grandes blocos de fundação é o alto consumo de aço e, conseqüentemente, a maior dificuldade no processo de adensamento do concreto. Em vista disso, a utilização do concreto autoadensável (CAA) apresenta benefícios neste tipo de processo construtivo. Sendo assim, no presente estudo, buscou-se vincular os pontos positivos de ambos os concretos para desenvolvimento e avaliação de CAAs com elevados teores de cinza volante, para aplicação em grandes blocos de fundação. Para tanto, foram desenvolvidos CAAs com teores de 0 (referência), 40%, 50% e 60% de cinza volante substituindo o cimento. Além disso, três amostras de cinza volante foram utilizadas com propriedades distintas entre si, como a procedência e a distribuição granulométrica. Deste modo, avaliou-se o desempenho dos CAAs quanto aos parâmetros de autoadensabilidade, elevação adiabática de temperatura, resistência à compressão e módulo de elasticidade. No estado fresco, a substituição de cimento por elevados teores de cinza volante, especialmente 50% e 60%, influenciou nos parâmetros de autoadensabilidade. Além do mais, cada cinza volante influenciou de maneira distinta ou com diferente intensidade. A utilização de elevados teores de cinza volante nos CAAs reduziu a elevação adiabática de temperatura. Para uma mesma cinza volante, esta redução foi mais significativa para o teor de 60% de substituição do cimento. No estado endurecido, para todas as cinzas avaliadas, a substituição do cimento resultou na redução da resistência à compressão. Estas reduções foram mais elevadas quanto maior o teor de substituição do cimento. Entretanto, os CAAs apresentaram acréscimos nos valores de resistência à compressão em função do aumento da idade de cura, de 28 para 91 dias. Estes acréscimos foram tanto maiores

quanto maior o teor de cinza volante utilizado, independentemente da cinza volante avaliada. Em relação ao módulo de elasticidade, o comportamento dos CAAs foi semelhante ao verificado na resistência à compressão, porém com reduções menos expressivas devido à substituição do cimento pelas cinzas volantes. Este fato indicou que a matriz cimentícia teve maior influência na resistência à compressão. Dos três tipos de cinza volante avaliados, aquela de granulometria mais fina apresentou o melhor desempenho, tanto no estado fresco quanto no estado endurecido dos CAAs. Considerando que, a redução na elevação da temperatura foi comprovada e, os valores de resistência à compressão dos CAAs excederam 40 MPa, aos 91 dias, concluiu-se que é possível utilizar CAAs com elevados teores de cinza volante em grandes blocos de fundação. No entanto, esta configuração de CAA não dispensa a avaliação prévia dos parâmetros de autoadensabilidade.

**Palavras-chave:** bloco de fundação; cinza volante; concretos autoadensáveis.

## ABSTRACT

The option for the high buildings execution is highlighted in Brazil, especially in the coast of Santa Catarina state. In these real estate developments, usually, the use of high volumes of concrete occurs, mainly in the great pile caps. The material used in these structural elements can be characterized as mass concrete where the occurrence of thermal stresses that could lead to cracking should be avoided. Among the possibilities to reduce the heat generation in the concrete, the reduction of the cement content by the substitution of this binder by high volumes of fly ash stands out. Concretes with this configuration are called high-volume fly ash concrete, where cement replacement takes place around 50%. Another feature commonly found in large pile caps is the high steel consumption and, consequently, the greater difficulty in the concrete consolidation. In view of this, the use of SCC (self-compacting concrete) has benefits in this type of construction process. Therefore, in the present study, it was tried to link the positive points of both concretes for the development and evaluation of SCC with high fly ash contents, for application in large pile caps. Therefore, SCC were developed with 0 (reference), 40%, 50% and 60% fly ash replacing the cement. In addition, three fly ash samples were used with different properties, such as the origin and particle size distribution. In this way, the SCC performance was evaluated for parameters of workability, adiabatic temperature rise, compressive strength and modulus of elasticity. In the fresh state, the replacement of cement by high levels of fly ash, especially 50% and 60%, influenced the workability parameters. Moreover, each fly ash influenced in a different way or with different intensity. The use of high fly ash content in SCC reduced adiabatic temperature elevation. For the same fly ash, this reduction was more significant for the 60% cement substitution content. In the hardened state, for all the ashes evaluated, cement replacement resulted in a compressive strength reduction. These reductions were greater the higher the cement replacement content. However, SCC showed increases in compressive strength values due to the increase in the age of cure, from 28 to 91 days. These increases were larger the higher the fly ash content, regardless of fly ash evaluated. Regarding the modulus of elasticity, the behavior of SCC was similar to that observed in the compressive strength, but with less expressive reductions due to the replacement of cement by fly ash. This fact indicated that the cementitious matrix had greater influence on the compressive strength. Among the three fly ash types evaluated, the one with the finest particle

size distribution presented the best performance, both in the fresh and hardened state of SCC. Whereas, the reduction in temperature rise was proven and, the values of compressive strength of SCC exceeded 40 MPa, at 91 days, it was concluded that it is possible to use SCC with high levels of fly ash in large pile caps. However, this configuration of SCC does not exempt the previous evaluation of the parameters of workability.

**Keywords:** pile caps; fly ash; self-compacting concrete.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Resultados encontrados no bloco de 511 m <sup>3</sup> : a) evolução da temperatura; b) simulação da distribuição da temperatura em 74 h (temperatura de pico) .....	47
Figura 2: Elevação de temperatura de concretos com cinza volante ....	66
Figura 3: Aumento de temperatura de concretos com cinza volante e concreto de referência .....	67
Figura 4: Curvas de liberação de calor de pastas com cinza volante em função do tempo.....	68
Figura 5: Micrografia das estruturas internas dos CAAs aos 28 dias (1000 ampliações): a) concreto referência; b) 20%; c) 40%; d) 60% de cinza volante .....	72
Figura 6: Relação entre resistência à compressão e teor de cinza volante, em função do tempo .....	74
Figura 7: Influência do teor de cinza volante na resistência à compressão e módulo de elasticidade aos 28 dias .....	79
Figura 8: Tendência do comportamento do módulo de elasticidade em função da substituição de cimento por cinza volante, aos 365 dias .....	81
Figura 9: Resistência à compressão do concreto sob diferentes condições de cura.....	84
Figura 10: Módulo de elasticidade do concreto sob diferentes condições de cura.....	85
Figura 11: Estrutura principal do programa experimental desenvolvido neste estudo.....	89
Figura 12: Ensaio de índice de desempenho com cimento Portland: a) verificação do índice de consistência; b) moldagem dos corpos de prova .....	95
Figura 13: Titulação da solução filtrada com HCl (frasco à esquerda, solução antes da titulação e frasco à direita, solução após titulação) ...	96
Figura 14: Verificação do espalhamento do CAA na mesa para índice de consistência.....	100
Figura 15: Esquema da composição volumétrica do CAA REF 1.....	102
Figura 16: Esquema da composição volumétrica dos CAAs com 40% de CVA e CVB.....	104
Figura 17: Esquema da composição volumétrica dos CAAs com 50% e 60% de CVA e CVB.....	108
Figura 18: Equipamentos para caracterização dos CAAs no estado fresco: a) espalhamento; b) funil V; c) caixa L; d) recipiente para verificação da exsudação .....	111

Figura 19: Esquema de montagem do calorímetro adiabático utilizado .....	113
Figura 20: Equipamentos utilizados no ensaio de calorimetria: a) vista externa do tanque de banho e sistema de comando; b) aquisitor de dados Datalogger .....	114
Figura 21: Equipamento para ensaio de módulo de elasticidade .....	115
Figura 22: Curva granulométrica do agregado graúdo.....	117
Figura 23: Curva granulométrica da composição de areia fina e areia de britagem.....	118
Figura 24: Distribuição granulométrica das cinzas e do cimento – porcentagem passante acumulada .....	119
Figura 25: Distribuição do tamanho das partículas das cinzas volantes e do cimento .....	120
Figura 26: Valores referentes ao consumo de aditivo superplastificante dos CAAs .....	130
Figura 27: Valores de viscosidade dos CAAs verificados através dos ensaios de Funil V e T500.....	135
Figura 28: Verificação de segregação e exsudação nos ensaios de espalhamento e caixa L: a) e b) CAA 60A; c) e d) CAA 60B; e) e f) CAA 60C.....	138
Figura 29: Curvas de elevação adiabática de temperatura dos CAAs REF 2, 40B, 50B e 60B.....	140
Figura 30: Curvas de elevação adiabática de temperatura dos CAAs REF 2, 60A, 60B e 60C.....	140
Figura 31: Redução percentual nos valores de resistência à compressão dos CAAs com cinza volante em relação aos CAAs REF .....	148
Figura 32: Valores de resistência à compressão dos CAAs produzidos na Etapa 1 .....	151
Figura 33: Valores de resistência à compressão dos CAAs produzidos na Etapa 2 .....	151
Figura 34: Valores de módulo de elasticidade dos CAAs produzidos na Etapa 1.....	161
Figura 35: Valores de módulo de elasticidade dos CAAs produzidos na Etapa 2.....	161
Figura 36: Comparativo entre valores de módulo de elasticidade estimados e os verificados experimentalmente nos CAAs.....	164
Figura 37: Distribuição do agregado graúdo no concreto endurecido	166

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Requisitos químicos e físicos para cinza volante.....	36
Tabela 2: Composições típicas do CAA .....	44
Tabela 3: Propriedades no estado fresco de CAAs com diferentes relações a/mc e teores de cinza volante .....	54
Tabela 4: Características no estado fresco dos CAAs, em função do teor de cinza volante.....	54
Tabela 5: Características no estado fresco dos CAAs com relação a/mc e teores de aditivo variáveis.....	57
Tabela 6: Características no estado fresco dos CAAs com relações a/mc variáveis e teor de aditivo constante .....	59
Tabela 7: CAAs com cinza volante e metacaulim em substituição ao cimento.....	60
Tabela 8: Valores de resistência à compressão para CAAs com cinza volante e filer calcário.....	76
Tabela 9: Valores de módulo de elasticidade avaliados até a idade de 365 dias, para concretos vibrados .....	80
Tabela 10: Módulo de elasticidade para concretos com diferentes teores e cinzas volantes .....	82
Tabela 11: Características do cimento CP V - ARI (dados fornecidos pelo fabricante) .....	90
Tabela 12: Composição potencial dos cimentos (método de Bogue) ...	91
Tabela 13: Caracterização física dos agregados utilizados .....	92
Tabela 14: Características do aditivo (dados fornecidos pelo fabricante) .....	93
Tabela 15: Índice de consistência das argamassas para verificação do índice de desempenho com cimento Portland.....	95
Tabela 16: Características do metacaulim (dados fornecidos pelo fabricante) .....	97
Tabela 17: Quantidade de corpos de prova para avaliação no estado endurecido.....	114
Tabela 18: Características da CVA, CVB e CVC.....	118
Tabela 19: Dados granulométricos para os percentuais D10, D50 e D90 das cinzas .....	120
Tabela 20: Índice de desempenho com cimento Portland aos 28 dias das cinzas utilizadas .....	121
Tabela 21: Índice de atividade pozolânica <i>Chapelle</i> modificado das cinzas utilizadas .....	122
Tabela 22: Índice de desempenho com cimento Portland aos 28 dias e <i>Chapelle</i> modificado do metacaulim .....	123

Tabela 23: Traço unitário, consumo de materiais por m <sup>3</sup> de concreto, massa específica e teor de ar para os CAAs da Etapa 1 .....	125
Tabela 24: Traço unitário, consumo de materiais por m <sup>3</sup> de concreto, massa específica e teor de ar para os CAAs da Etapa 2.....	126
Tabela 25: Resultados dos ensaios de caracterização dos CAAs no estado fresco.....	129
Tabela 26: Volume de finos dos CAAs desconsiderando as partículas das cinzas volantes maiores de 75 µm .....	132
Tabela 27: Elevação de temperatura e coeficiente de elevação adiabática de temperatura dos CAAs .....	141
Tabela 28: Tempo para início da elevação da temperatura em 5°C dos CAAs.....	145
Tabela 29: Valores médios de resistência à compressão dos CAAs ...	147
Tabela 30: ANOVA – influência dos parâmetros na resistência à compressão dos CAAs com cinza volante .....	154
Tabela 31: ANOVA - comparação dos valores médios de resistência à compressão dos CAAs para as diferentes cinzas volantes .....	155
Tabela 32: ANOVA - comparação de médias dos valores de resistência à compressão para diferentes teores de cada cinza volante.....	155
Tabela 33: Indicador de desempenho do uso do cimento nos CAAs..	156
Tabela 34: Relação entre a elevação adiabática de temperatura e a resistência à compressão dos CAAs.....	157
Tabela 35: Valores médios de módulo de elasticidade dos CAAs.....	158
Tabela 36: Redução percentual nos valores de módulo de elasticidade dos CAAs com cinza volante em relação aos CAAs REF .....	158
Tabela 37: ANOVA – influência dos parâmetros no módulo de elasticidade dos CAAs com cinza volante .....	163

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

a/c	Relação água/cimento
a/mc	Relação água/materiais cimentícios
ACI	American Concrete Institute
AFm	Monossulfato
AFt	Etringita
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Óxido de alumina
ASTM	American Society For Testing And Materials
CAA	Concreto autoadensável
CAAs	Concretos autoadensáveis
Ca <sup>+2</sup>	Íon de cálcio
CaCO <sub>3</sub>	Carbonato de cálcio
C-A[Fe]-S-H	Sílico-ferro-aluminato de cálcio hidratado
C-A-H	Aluminato de cálcio hidratado
CaO	Óxido de cálcio
Ca(OH) <sub>2</sub>	Hidróxido de cálcio
CASAN	Companhia Catarinense de Águas e Saneamento
C-A-S-H	Sílico-aluminato de cálcio hidratado
CCR	Concreto compactado com rolo
CH	Hidróxido de cálcio
Cl <sup>-</sup>	Íon cloreto
cm	Centímetro
cm <sup>2</sup>	Centímetro quadrado
CO <sub>2</sub>	Dióxido de carbono
CP II F	Cimento Portland composto com filer
CP IV	Cimento Portland Pozolânico
CP V ARI	Cimento Portland de Alta Resistência Inicial
C-S-H	Silicato de cálcio hidratado
C $\bar{S}$	Sulfato de cálcio
CV	Cinza volante
C <sub>2</sub> S	Silicato dicálcico
C <sub>3</sub> A	Aluminato tricálcico
C <sub>3</sub> S	Silicato tricálcico
C <sub>4</sub> AF	Ferroaluminato tetracálcico
DMC	Dimensão máxima característica do agregado
EFNARC	European Federation for Specialist Construction Chemicals and Concrete Systems
fc	Resistência à compressão
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Óxido de ferro

g	Grama
GPa	Gigapascal
GTec	Grupo de Tecnologia em Materiais e Componentes à Base de Cimento Portland
h	Hora
HCl	Ácido clorídrico
HVFA	High-volume fly ash
H <sub>2</sub> /H <sub>1</sub>	Relação de alturas do concreto autoadensável na caixa L
H <sub>2</sub> O	Água
IPT/EPUSP	Instituto de Pesquisas Tecnológicas / Escola Politécnica da Universidade de São Paulo
kg	Quilograma
K <sub>2</sub> O	Óxido de potássio
L	Litros
LMCC	Laboratório de Materiais de Construção Civil
M	Mol/litro
m	Metro
MgO	Óxido de magnésio
mL	Mililitro
mm	Milímetro
MPa	Megapascal
m <sup>2</sup>	Metro quadrado
m <sup>3</sup>	Metro cúbico
Nanotec	Laboratório de Nanotecnologia
NBR	Norma Brasileira
NBR NM	Norma MERCOSUL
nm	Nanômetro
Na <sub>2</sub> O	Óxido de sódio
PL	Classe de habilidade passante do concreto autoadensável
REF	CAA de referência
rpm	Rotações por minuto
RS	Rio Grande do Sul
s	Segundo
SC	Santa Catarina
SF	Classe de espalhamento do concreto autoadensável
SIMAE	Serviço Intermunicipal de Água e Esgoto
SiO <sub>2</sub>	Óxido de sílica
SO <sub>3</sub>	Óxido sulfato

$T_{500}$	Tempo de espalhamento do concreto autoadensável até uma marcação de 500 milímetros
UFSC	Universidade Federal de Santa Catarina
UNOESC	Universidade do Oeste de Santa Catarina
VS/VF	Classe de viscosidade do concreto autoadensável
$^{\circ}\text{C}$	Graus Celsius
$\Delta T$	Diferença de temperatura
$\mu\text{m}$	Micrômetro



## SUMÁRIO

<b>1.</b>	<b>INTRODUÇÃO .....</b>	<b>25</b>
1.1	JUSTIFICATIVA.....	27
1.2	OBJETIVOS .....	28
<b>1.2.1</b>	<b>Objetivo Geral.....</b>	<b>28</b>
<b>1.2.2</b>	<b>Objetivos Específicos .....</b>	<b>28</b>
1.3	ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO.....	28
<b>2.</b>	<b>REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....</b>	<b>31</b>
2.1	CONCRETO AUTOADENSÁVEL .....	31
<b>2.1.1</b>	<b>Caracterização do CAA.....</b>	<b>31</b>
<b>2.1.2</b>	<b>Materiais constituintes.....</b>	<b>32</b>
2.1.2.1	Cimento Portland.....	32
2.1.2.2	Agregados.....	33
2.1.2.3	Aditivo químico superplastificante .....	34
2.1.2.4	Adições minerais .....	35
2.1.2.4.1	<i>Cinza volante</i> .....	35
2.1.2.4.2	<i>Metacaulim</i> .....	39
<b>2.1.3</b>	<b>Métodos de dosagem .....</b>	<b>40</b>
2.1.3.1	Método Gtec.....	43
2.1.3.2	Proporções dos constituintes do CAA.....	44
<b>2.1.4</b>	<b>Resistência à compressão e módulo de elasticidade....</b>	<b>44</b>
2.2	CONCRETO MASSA .....	46
2.3	CONCRETOS COM ELEVADOS TEORES DE CINZA VOLANTE .....	50
2.4	CONCRETOS AUTOADENSÁVEIS COM ELEVADOS TEORES DE CINZA VOLANTE .....	52
<b>2.4.1</b>	<b>Influência nos parâmetros de autoadensabilidade.....</b>	<b>53</b>
2.4.1.1	Desempenho com utilização de metacaulim .....	59
2.4.1.2	Desempenho com aditivos químicos redutores de água..	60
<b>2.4.2</b>	<b>Hidratação do sistema cimento Portland - cinza volante .....</b>	<b>61</b>
2.4.2.1	Calor de hidratação.....	66
<b>2.4.3</b>	<b>Influência no estado endurecido .....</b>	<b>71</b>
2.4.3.1	Resistência à compressão .....	72
2.4.3.2	Módulo de elasticidade.....	78
2.4.3.3	Efeitos das condições de cura.....	83
<b>2.4.4</b>	<b>Considerações .....</b>	<b>86</b>
<b>3.</b>	<b>PROGRAMA EXPERIMENTAL .....</b>	<b>88</b>
3.1	SELEÇÃO E CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS	89
<b>3.1.1</b>	<b>Cimento Portland.....</b>	<b>90</b>

3.1.2	<b>Agregados</b> .....	91
3.1.3	<b>Aditivo</b> .....	93
3.1.4	<b>Água</b> .....	93
3.1.5	<b>Cinza volante</b> .....	93
3.1.5.1	Ensaio de caracterização das cinzas volantes.....	94
3.1.5.1.1	<i>Índice de desempenho com cimento Portland</i> .....	94
3.1.5.1.2	<i>Chapèlle modificado</i> .....	95
3.1.6	<b>Metacaulim</b> .....	97
3.2	<b>MÉTODOS PARA COMPOSIÇÃO E AVALIAÇÃO DOS CAAS</b> .....	98
3.2.1	<b>Concretos autoadensáveis produzidos na Etapa 1</b> .....	99
3.2.1.1	Concreto autoadensável de referência da Etapa 1 (CAA REF 1).....	99
3.2.1.2	CAAs com 40% de CVA e CVB substituindo o cimento ... ..	102
3.2.2	<b>Concretos autoadensáveis produzidos na Etapa 2</b> ....	105
3.2.2.1	Concreto autoadensável de referência da Etapa 2 (CAA REF 2).....	105
3.2.2.2	CAAs com 50% e 60% de CVA e CVB substituindo o cimento .....	105
3.2.2.3	CAAs com CVC (moída).....	108
3.3	<b>ENSAIOS DE CARACTERIZAÇÃO DOS CAAS</b> .....	109
3.3.1	<b>Estado fresco</b> .....	109
3.3.2	<b>Elevação adiabática de temperatura</b> .....	112
3.3.3	<b>Estado endurecido</b> .....	114
4.	<b>APRESENTAÇÃO E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS</b> .....	117
4.1	<b>CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS</b> .....	117
4.1.1	<b>Agregados</b> .....	117
4.1.2	<b>Cinza volante</b> .....	118
4.1.2.1	Distribuição granulométrica – cinzas volantes e cimento ... ..	119
4.1.2.2	<i>Índice de desempenho com cimento Portland</i> .....	121
4.1.2.3	<i>Chapèlle modificado</i> .....	122
4.1.3	<b>Metacaulim</b> .....	123
4.2	<b>CAAS NO ESTADO FRESCO</b> .....	124
4.2.1	<b>Composição final dos CAAs</b> .....	124
4.2.2	<b>Ensaio de caracterização</b> .....	128
4.2.2.1	Fluidez .....	129
4.2.2.2	Viscosidade plástica aparente .....	133
4.2.2.3	Habilidade passante .....	136

4.2.2.4	Segregação e exsudação .....	136
4.3	ELEVAÇÃO ADIABÁTICA DE TEMPERATURA ...	139
4.4	CAAS NO ESTADO ENDURECIDO .....	146
<b>4.4.1</b>	<b>Resistência à compressão.....</b>	<b>146</b>
<b>4.4.2</b>	<b>Módulo de elasticidade .....</b>	<b>157</b>
<b>5.</b>	<b>CONSIDERAÇÕES FINAIS .....</b>	<b>168</b>
5.1	CONCLUSÕES .....	168
5.2	SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS .....	171
<b>REFERÊNCIAS .....</b>		<b>173</b>
<b>APÊNDICES .....</b>		<b>187</b>



## 1. INTRODUÇÃO

O crescimento constante dos grandes centros urbanos tem limitado cada vez mais os espaços disponíveis para implantação de novas construções de tal maneira que a opção pela verticalização dos novos empreendimentos imobiliários também tem aumentado. No Brasil, e em especial no litoral do estado de Santa Catarina (SC), o desenvolvimento de edificações altas tem ganhado destaque.

Segundo o *Council on Tall Buildings and Urban Habitat* (2016), dentre os edifícios em execução, pode-se citar o *Yachthouse Residence Club* (torres A e B) com 270 metros (m) de altura cada, *One Tower* com 263 m e o *Infinity Coast Tower* com 237 m, todos localizados na cidade de Balneário Camboriú-SC. Em nível mundial, destaca-se o *Jeddah Tower*, conhecido também como *Kingdom Tower*, com 1000 m de altura, localizado em Jeddah na Arábia Saudita, e o *Burj Khalifa* com 828 m, localizado em Dubai nos Emirados Árabes, concluído em 2010.

Em obras com as características supracitadas, normalmente ocorre a execução de elementos estruturais que apresentam grandes dimensões e, por consequência, demandam elevados volumes de concreto, como os blocos de fundação. Estes blocos podem ser definidos como estruturas de grande volume usadas para transmitir as cargas da superestrutura para as fundações profundas.

Como exemplos de aplicação, pode-se mencionar a concretagem do bloco de fundação do edifício *Infinity Coast*, realizada com aproximadamente 5300 m<sup>3</sup> de concreto (SALUM *et al.*, 2014), e a execução dos blocos de fundação das torres do *Yachthouse Residence Club*, com volumes aproximados de 4200 e 4734 m<sup>3</sup> (SANTOS *et al.*, 2015). Louzas (2014), por sua vez, cita a maior concretagem em fluxo contínuo registrada, com duração de 18 horas e lançamento de 16200 m<sup>3</sup> de concreto para execução do bloco de fundação do edifício *New Wilshire Grand*, de 73 andares, localizado em Los Angeles, na Califórnia, Estados Unidos.

O material utilizado nesses elementos de fundação pode ser caracterizado como concreto massa, cuja definição, de acordo com o *ACI Concrete Terminology* (2013), é qualquer concreto em que a combinação de seu volume e condições de contorno podem conduzir a tensões térmicas indesejáveis que levem as peças à fissuração, reações químicas deletérias e a redução da resistência a longo prazo, em consequência da geração de calor proveniente da hidratação do cimento.

Nos grandes blocos de fundação, além dos volumes consideráveis de concreto, normalmente há também alta concentração de armaduras, fato este que dificulta o processo de adensamento. Além disso, o adensamento do concreto pode ser ainda mais complexo nesses elementos devido a execução dos mesmos ser realizada, geralmente, com alturas elevadas. SANTOS *et al.* (2015) citam a concretagem de blocos de fundação com alturas variando de 3,5 m a 5,5 m. Especialmente em função dessas características, a utilização do concreto autoadensável nesses sistemas construtivos tem ganhado cada vez mais espaço (BOUZOUBAÁ; LACHEMI, 2001; CELIK *et al.*, 2015).

No entanto, em função da alta fluidez, a produção do concreto autoadensável requer o controle de exsudação e segregação, ou seja, o concreto deve ser trabalhável e coeso simultaneamente. Assim, a utilização de grande teor de finos, como cimento ou outras adições suplementares, é uma opção utilizada para estabilização destas misturas. Porém, peças concretadas que apresentem alto consumo de cimento, também podem exibir problemas de origem térmica (MEHTA; MONTEIRO, 2014).

Notoriamente, há dois fatores que prevalecem na escolha do concreto a ser utilizado em grandes blocos de concreto, sendo estes atrelados ao comportamento térmico proveniente das reações exotérmicas de hidratação do cimento e à dificuldade operacional vinculada ao processo de adensamento.

Dentre as possibilidades de minimização dos efeitos oriundos da elevação da temperatura no concreto, a redução do consumo de cimento certamente é a mais interessante. Assim, estima-se que a substituição parcial, porém em grandes quantidades, de cimento por cinza volante pode ser uma alternativa viável. Concretos com esta configuração, normalmente vinculados a um teor de 50% de substituição do cimento, são apresentados na literatura como concretos com elevados teores de cinza volante e são conhecidos justamente pelos benefícios proporcionados na redução do calor de hidratação.

Portanto, busca-se neste estudo, vincular os benefícios de ambos os concretos mencionados, na expectativa de desenvolver concretos autoadensáveis com elevados teores de cinza volante, atrelando a praticidade no momento da concretagem e a minimização dos efeitos térmicos oriundos da hidratação do cimento, a fim de aplicar este material em elementos massivos, como em grandes blocos de fundação.

## 1.1 JUSTIFICATIVA

As constantes pesquisas de misturas cimentícias incorporando cinza volante reflete os benefícios de sua utilização. Porém, as avaliações dos efeitos da aplicação desta pozolana no concreto comumente encontram-se em teores limites da ordem 40% em substituição ao cimento. Bentz e Ferraris (2010) e Celik *et al.* (2015), entretanto, demonstraram que a utilização de grandes volumes de cinza volante em substituição ao cimento (superiores a 40%) retarda os tempos de início e fim de pega dessas misturas. Além disso, outro fator limitante da aplicação desse concreto em estruturas convencionais é a menor resistência à compressão desenvolvida em idades iniciais, inclusive aos 28 dias - idade normalmente utilizada como parâmetro para avaliação dessa propriedade mecânica.

Entretanto, há situações que podem ser utilizados concretos com controle em idades mais avançadas, como 90, 180 dias e até um ano, compatíveis com os tempos de carregamento da estrutura (SANTOS; BITTENCOURT; GRAÇA, 2011). Esta condição retrata a perspectiva da solicitação estrutural dos grandes blocos de fundação, visto a execução da superestrutura normalmente avançar gradativamente em empreendimentos com alturas elevadas e, portanto, não ocorrendo o carregamento total destes elementos aos 28 dias.

Desse modo, considerando as propriedades abordadas e partindo-se da premissa de que a redução do calor de hidratação é uma das grandes vantagens da utilização desse sistema em casos especiais, como no concreto massa (RASHAD, 2015), julga-se que o desenvolvimento de concretos autoadensáveis com elevados teores de cinza volante vá ao encontro às expectativas necessárias para execução de grandes blocos de concreto, visando usufruir, também, de benefícios como a facilidade no momento da concretagem.

Outro parâmetro relevante da pesquisa refere-se à avaliação do comportamento no estado fresco e endurecido de concretos autoadensáveis, em função da utilização de diferentes teores de cinza volante. Destaca-se ainda o emprego de cinzas com características diferenciadas, como a distribuição granulométrica e a origem, visto que alterações físicas e químicas dessa pozolana podem alterar o desempenho quando inseridas no concreto. Além disso, atenta-se para a dificuldade de se realizar substituições volumétricas de cimento por cinza volante, devido à diferença de comportamento quanto à adsorção de água das partículas e, conseqüentemente, maior tendência à segregação e, principalmente, à exsudação das misturas cimentícias.

Esta última abordagem é vinculada ao fato de que as partículas de cinza volante possivelmente apresentem forças superficiais menos expressivas em comparação às do cimento, devidas ao processo de obtenção e natureza mineralógica.

Ressalta-se, também, que atuar atendendo ao conceito de desenvolvimento sustentável aliado à busca por alternativas para minimizar o custo das construções estão entre os grandes desafios da Engenharia Civil na atualidade, e a utilização de cinza volante substituindo parcialmente o cimento está diretamente atrelada a esta expectativa (DINAKAR; BABU; SANTHANAM, 2008).

## 1.2 OBJETIVOS

### 1.2.1 Objetivo Geral

Avaliar propriedades no estado fresco e endurecido de concretos autoadensáveis com elevados teores de cinza volante em substituição ao cimento Portland.

### 1.2.2 Objetivos Específicos

Os objetivos relacionados a seguir referem-se à utilização de elevados teores de cinza volante em substituição ao cimento, sendo os mesmos:

- avaliar parâmetros de autoadensabilidade dos concretos;
- analisar o comportamento térmico, por meio de curvas de elevação adiabática de temperatura, dos concretos autoadensáveis;
- avaliar propriedades de resistência à compressão e módulo de elasticidade estático dos concretos autoadensáveis;
- verificar a influência de tipos distintos de cinza volante no comportamento de concretos autoadensáveis no estado fresco e endurecido.

## 1.3 ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO

A estrutura que compõe este documento está dividida em cinco capítulos, sendo estes: Introdução, Revisão bibliográfica, Programa experimental, Apresentação e discussão dos resultados e Considerações finais.

No primeiro capítulo, apresenta-se a introdução do assunto, seguida da justificativa para este estudo, seus objetivos e a organização do documento.

No capítulo de Revisão bibliográfica, apresentam-se aspectos relativos aos tipos de concreto vinculados ao desenvolvido nesta pesquisa, sendo estes, concreto autoadensável (CAA), concreto massa, concreto com elevados teores de cinza volante e por fim, CAA com elevados teores de cinza volante. De imediato, ênfase é dada para as características principais da cinza volante como material constituinte do CAA, com posterior abrangência da utilização desta pozolana em níveis elevados de substituição do cimento Portland.

O terceiro capítulo aborda o programa experimental, com descrição dos materiais e metodologias de ensaio utilizadas na pesquisa.

No quarto capítulo estão apresentados os resultados e as respectivas análises. O quinto capítulo retrata as conclusões finais extraídas desta pesquisa com sugestões para trabalhos futuros. Em seguida, encontram-se as referências e, por fim, os apêndices.



## 2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

### 2.1 CONCRETO AUTOADENSÁVEL

Concreto autoadensável (CAA) é aquele capaz de fluir e se autoadensar pelo próprio peso, preenchendo completamente a forma mesmo na presença de armadura densa, mantendo-se homogêneo com ausência de segregação em todos os processos de mistura, transporte, lançamento e acabamento (EFNARC, 2005; NBR 15823-1, 2010; MEHTA; MONTEIRO, 2014).

Características como alta fluidez, conseguida através do uso de aditivos superplastificantes, viscosidade moderada e coesão, alcançadas através de dosagem adequada de adições minerais finas ou aditivo modificador de viscosidade, são essenciais para o concreto se autoadensar (GOMES; BARROS, 2009).

Nehdi, Pardhan e Koshowski (2004) citam benefícios da utilização do CAA tais como a redução no tempo de execução, mão de obra e quantidade de equipamentos nos canteiros de obras, maior facilidade na concretagem de elementos estruturais com alta concentração de armaduras e locais de difícil acesso, redução do barulho produzido pelos vibradores e auxílio na obtenção de superfícies com acabamentos de melhor qualidade.

Segundo Tutikian e Dal Molin (2015), a elevada fluidez aliada à resistência à segregação do CAA possibilita a eliminação de falhas de concretagem, existência de bolhas de ar e eliminação de macrodefeitos, fatores estes que influenciam diretamente nas perdas de desempenho mecânico e durabilidade das estruturas.

#### 2.1.1 Caracterização do CAA

Segundo EFNARC (2002), um concreto pode ser classificado como autoadensável somente se atender, em seu estado fresco, as propriedades de habilidade de preenchimento, habilidade passante e resistência à segregação. EFNARC (2002), EFNARC (2005) e NBR 15823-1 (2010) apresentam as definições destas propriedades, a saber:

- habilidade de preenchimento (fluidez): capacidade do CAA fresco em fluir dentro da forma para preencher todos os espaços;

- habilidade passante: capacidade do CAA fluir em espaços confinados, áreas com grande quantidade de armaduras e descontinuidades geométricas, mantendo sua uniformidade, sem apresentar segregação e sem causar bloqueios;
- resistência à segregação: capacidade do CAA em estado fresco de manter sua composição homogênea durante os processos de transporte, lançamento e acabamento.

Gomes e Barros (2009) comentam que a capacidade de preenchimento é governada pela alta fluidez e coesão da mistura, a habilidade passante é conduzida pela viscosidade da pasta, da argamassa e pelas características dos agregados, e a resistência à segregação é influenciada pela viscosidade e coesão da mistura.

No Brasil, a NBR 15823 (2010) estabelece requisitos de classificação do CAA no estado fresco, define as classes de autoadensabilidade e apresenta os procedimentos para realização dos ensaios de caracterização. Estes parâmetros, assim como comentários relacionados ao assunto e alguns ensaios complementares apresentados em normas internacionais, estão descritos no Apêndice A.

### **2.1.2 Materiais constituintes**

A composição do CAA assemelha-se a do concreto convencional vibrado. Porém, no primeiro caso, utiliza-se maior quantidade de finos, como adições minerais reativas ou fillers, e aditivos químicos como superplastificantes e/ou modificadores de viscosidade (TUTIKIAN; DAL MOLIN, 2015). Em função desta afinidade dos materiais utilizados em ambos os concretos, apenas uma breve descrição de alguns dos componentes está apresentada, considerando as principais indicações de cada um para aplicação em concretos autoadensáveis (CAAs).

#### **2.1.2.1 Cimento Portland**

Gomes e Barros (2009) citam que qualquer tipo de cimento Portland pode ser utilizado no CAA, desde que atenda as exigências de cada aplicação.

No entanto, segundo Gjorv (1992<sup>1</sup> *apud* TUTIKIAN; DAL MOLIN, 2015), para aplicação no CAA, a utilização de cimentos com maior superfície específica é recomendada em função da coesão necessária. Além disso, a maior quantidade de partículas em contato com a água reduz a distância e aumenta a frequência de colisão entre elas, diminuindo a tensão de escoamento e aumentando a viscosidade da mistura. Cimentos de finura elevada, com teores mais elevados de álcalis e C<sub>3</sub>A demandam maior quantidade de aditivo superplastificante e podem apresentar perda considerável de fluidez do CAA (REPETTE, 2011).

### 2.1.2.2 Agregados

Agregados miúdos têm grande influência sobre as propriedades do CAA no estado fresco. Elevados volumes de pasta reduzem o atrito interno entre as partículas de areia. No entanto, uma boa distribuição granulométrica é essencial. A parcela de partículas menor que 0,125 mm, deve ser incluída no teor de finos da pasta, assim como, na relação água/finos (EFNARC, 2005). De acordo com Repette (2011), partículas de materiais menores que 0,15 mm são consideradas como finos, sendo preferível que destas, mais de 75% sejam menores que 0,075 mm.

Segundo Repette (2011), as areias grossas demandam aumento no teor de pasta, sendo, portanto, preferível a utilização de areias com módulo de finura aproximado de 1,0 a 2,4. Alguns métodos de dosagem, utilizam areias misturadas para otimizar a curva granulométrica e assim, reduzir o teor de pasta na mistura (EFNARC, 2005). De acordo com Tutikian e Dal Molin (2015), quando se utiliza areia industrial, deve-se atentar para possíveis discontinuidades na composição granulométrica, ou seja, lacunas nas frações intermediárias, fato que pode facilmente ser corrigido fazendo composição com areia de rio.

Quanto aos agregados graúdos, a forma e a distribuição do tamanho dos grãos influenciam diretamente a fluidez e a habilidade passante do CAA, além da demanda de pasta. Partículas mais esféricas reduzem a ocorrência de bloqueios e aumentam a fluidez, devido à redução do atrito interno. O tamanho máximo do agregado graúdo normalmente é limitado de 12 mm a 20 mm, ou em função do espaçamento da armadura (EFNARC, 2005).

---

<sup>1</sup> GJORV, O. E. High-strength concrete. In: ADVANCES IN CONCRETE TECHNOLOGY, Athens, 1992. Proceedings. Montreal: CANMET, 1992. p. 21-77.

Mehta e Monteiro (2014) citam a dimensão máxima entre 19 mm e 25 mm, porém, de acordo com Repette (2011), a utilização de agregados com dimensão máxima característica de 9,5 mm é bem difundida no CAA, devido ao bom desempenho em comparação com agregados de maior dimensão. Além disso, quanto maior a dimensão do agregado, mais viscosas devem ser a pasta e argamassa para evitar segregação, sendo também mais propensos a causar bloqueios quando o concreto passar por locais com restrições.

### 2.1.2.3 Aditivo químico superplastificante

A alta viscosidade da argamassa ou pasta do CAA e elevada capacidade de deformação, são atingidas através da utilização de aditivos superplastificantes, que proporcionam a deformabilidade necessária com baixa relação água/finos (OKAMURA; OUCHI, 2003).

A principal diferença entre aditivos químicos plastificantes e superplastificantes está na eficácia na redução da quantidade de água para dada consistência do concreto, sendo os superplastificantes denominados como redutores de água de alta eficiência. Estes são classificados com base em sua composição química, como os superplastificantes condensados de formaldeído sulfonatos de naftaleno ou melamina, e os superplastificantes a base de policarboxilatos-poliéteres. Estes últimos, são conhecidos por serem menos imprevisíveis quanto aos efeitos nos tempos de pega das misturas cimentícias e pela melhor manutenção da trabalhabilidade (HARTMANN *et al.*, 2011), além de serem os mais utilizados em CAA (REPETTE, 2011).

De acordo com Mehta e Monteiro (2014), nos aditivos de base policarboxilatos, em vez da repulsão eletrostática (como ocorre com os condensados de naftaleno ou melamina), é a repulsão estérica o mecanismo dominante da dispersão do cimento. Como as cadeias deste aditivo são em forma de pente, o lado da cadeia polimérica é adsorvido na superfície do grão de cimento, enquanto que o lado longo não adsorvido (lado dentado do aditivo), cria a repulsão estérica através de barreiras físicas de pequena extensão entre as partículas do cimento. Ou seja, as cadeias do lado dentado do aditivo estendem-se a partir dos sítios de adsorção da superfície do cimento, impedindo que partículas do cimento vizinhas alcancem a faixa onde a força de atração de *Van der Waals* é efetiva.

Devido ao mecanismo de dispersão dos aditivos policarboxilatos, não ocorre redução significativa da viscosidade da pasta, propriedade requerida para evitar a segregação do CAA, porém,

cabe a ressalva que é a tensão de escoamento da pasta que tem maior influência na segregação do CAA (REPETTE, 2011).

#### 2.1.2.4 Adições minerais

Para alcançar a combinação satisfatória de fluidez elevada e estabilidade do CAA, altos volumes de materiais finos são utilizados nas misturas, que representam o conjunto de cimento e adições minerais (DOMONE, 2007). Em outras palavras, a fim de reduzir consumos elevados de cimento, as adições são largamente empregadas (GRANATA, 2015).

Dentre as adições utilizadas, pode-se citar os filers calcário, pó de quartzo e pó de pedra, a escória granulada de alto forno e pozolanas como a cinza volante, sílica ativa, metacaulim e cinza de casca de arroz (DAL MOLIN, 2011). Há relatos também da utilização de pó de mármore e pó de pedra-pomes (origem vulcânica) em CAA (GRANATA, 2015).

Os filers, em geral, são materiais finamente moídos e quimicamente inertes que, devido as suas propriedades físicas, contribuem no empacotamento granulométrico da mistura apresentando efeitos benéficos sobre as propriedades do concreto, como trabalhabilidade, exsudação e permeabilidade, podendo melhorar a hidratação do cimento atuando como pontos de nucleação (DAL MOLIN, 2011; NEVILLE; BROOKS, 2013)

A cinza volante, o metacaulim e a sílica ativa são exemplos de adições minerais com atividade pozolânica. Estas reagem com hidróxido de cálcio ( $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ) em presença de água formando compostos com propriedades cimentícias (NBR 12653, 2015). A escória granulada de alto forno é um material cimentante, ou seja, não precisa do hidróxido de cálcio para formar produtos cimentícios. No entanto, sua auto-hidratação é normalmente lenta (DAL MOLIN, 2011). Mais detalhes sobre a atuação de pozolanas, em especial quando da utilização de cinza volante em misturas cimentícias, estão apresentados a seguir.

##### 2.1.2.4.1 Cinza volante

A cinza volante é uma pozolana artificial obtida por meios mecânicos ou eletrostáticos, a partir dos gases de combustão do carvão mineral em usinas termelétricas (NEVILLE; BROOKS, 2013). São utilizadas como subprodutos industriais para aplicação como adição

mineral em concretos de cimento Portland (MEHTA; MONTEIRO, 2014).

Esta adição apresenta atividade pozolânica por ser um material com composição química principal que inclui sílica e alumina. Apresenta frações cristalinas inertes e frações vítreas. Estas últimas reagem, em temperatura ambiente, com o  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  formado a partir da hidratação do clínquer, desenvolvendo compostos como silicato de cálcio hidratado e aluminato de cálcio hidratado (Fu *et al.*, 2002).

A NBR 12653 (2015) apresenta requisitos químicos e físicos para classificação da cinza volante como material pozolânico, denominando-a como classe C. Da mesma forma, a ASTM C 618 (2015) classifica a cinza volante com propriedades apenas pozolânicas em classe F, e aquelas com propriedades pozolânicas e cimentantes como classe C. A Tabela 1 apresenta alguns dos requisitos químicos e físicos para classificação desta pozolana.

Tabela 1: Requisitos químicos e físicos para cinza volante

Norma/Classe	NBR 12653	ASTM C618	
	C	F	C
<b>Requisitos químicos</b>			
$\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3$ * (% min.)	70	70	50
$\text{SO}_3$ ** (% máx.)	5	5	5
Teor de umidade (% máx.)	3	3	3
Perda ao fogo (% máx.)	6	6	6
<b>Requisitos físicos</b>			
Material retido na peneira $45\mu\text{m}$ (% máx.)	20	34	34
Índice de desempenho com cimento Portland aos 28 dias, em relação ao controle *** (% min.)	90	75	75
Atividade pozolânica com cal aos 7 dias (MPa, min.)	6	-	-

\* Sílica, alumina e ferro.

\*\* Sulfato.

\*\*\* O método de ensaio para verificação do índice de desempenho com cimento Portland é realizado através de procedimentos distintos, conforme abordado pelas respectivas normas NBR e ASTM.

Fonte: adaptada de NBR 12653 (2015) e ASTM C 618 (2015).

Em função da maioria das bibliografias relacionarem a classificação das cinzas volantes conforme a ASTM C 618, em classe C e classe F, a mesma abordagem será utilizada neste trabalho. As cinzas volantes classe C normalmente apresentam conteúdo total de cálcio mais elevado do que as cinzas volantes Classe F. Segundo Dal Molin (2011),

no Brasil as cinzas com baixo teor de cálcio são as mais utilizadas em concretos.

Conforme Mehta e Monteiro (2014), as cinzas volantes com baixo teor de cálcio, aproximadamente 10% a 15%, são constituídas basicamente por aluminossilicatos vítreos, devido às grandes proporções de sílica e alumina presentes. Análises por difração de raio X comprovaram que os principais minerais cristalinos nesta classificação de cinza volante são quartzo, mulita e hematita e/ou magnetita. Visto que, em temperatura ambiente, estes minerais cristalinos não são reativos, sua presença em grandes proporções tende a diminuir a atividade pozolânica da cinza volante.

Em contrapartida, as cinzas volantes classe C, com teores de cálcio entre 15% a 40%, são mais reativas em comparação com as cinzas Classe F, pois possuem a maior parte do cálcio no formato de compostos cristalinos reativos, como aluminato tricálcico ( $C_3A$ ) e sulfato de cálcio ( $CS$ ), apresentando também, em sua fase não cristalina, íons de cálcio em quantidade suficiente para intensificar a reatividade do aluminossilicato vítreo (MEHTA; MONTEIRO, 2014). Conforme Neville (2016), neste tipo de cinza volante, o cálcio reage com parte da sílica e da alumina, ocorrendo assim redução destes componentes para reagir com o hidróxido de cálcio liberado pela hidratação do cimento.

Feldman, Carette e Malhotra (1990) relataram que partículas de cinza volante podem ter áreas particularmente ativas para reação, sendo este efeito considerado significativo quando grande volume desta pozolana está presente no sistema cimentício, influenciando inclusive na resistência à compressão. Neste sentido, segundo Lam, Wong e Poon (2000), há diferenças significativas entre o desenvolvimento da hidratação de sistemas com teores de 10% a 25% de cinza volante, e sistemas com teores acima de 50%, em peso, desta pozolana.

Quanto às partículas das cinzas volantes, a maioria aparece como esferas vítreas sólidas, com pequena quantidade de esferas ocas vazias, chamadas cenosferas ou ocas repletas de numerosas esferas menores, denominada plerosferas (DAL MOLIN, 2011; MEHTA; MONTEIRO, 2014).

Características como distribuição do tamanho das partículas, morfologia e superfície da cinza volante, influenciam diretamente a necessidade de água e a trabalhabilidade do concreto fresco, assim como na atividade de desenvolvimento da resistência do concreto endurecido. Cinzas volantes com mais de 5% de carbono são indesejáveis para aplicação como adição no concreto, pois as partículas de carbono

demandam mais água para uma dada consistência (MEHTA; MONTEIRO, 2014).

A redução no consumo de água para dada trabalhabilidade, normalmente proporcionada pelas partículas esféricas da cinza volante, também é proveniente de uma melhor dispersão do cimento, que ocorre quando as partículas da cinza são muito pequenas e suas superfícies carregadas eletricamente mantêm adsorvidos grãos de cimento, causando a dispersão do sistema. Os diâmetros das partículas das cinzas volantes variam de menos de 1  $\mu\text{m}$  a mais de 150  $\mu\text{m}$ , com boa parte das partículas inferiores a 45  $\mu\text{m}$ . A superfície específica varia em torno de 300 a 700  $\text{m}^2/\text{kg}$ , aferida por técnica de adsorção de nitrogênio, e a massa específica normalmente encontra-se entre 1900 a 2400  $\text{kg}/\text{m}^3$  (DAL MOLIN, 2011).

Possíveis variações na operação de termelétricas, utilização de carvão não uniforme e cinzas volantes produzidas em diferentes usinas, podem resultar em características variáveis deste subproduto. Assim, o emprego de cinza volante no concreto não pode ser baseado em propriedades padronizadas. Diferenças físicas e químicas desta adição, inclusive variações nos teores incorporados, resultam em efeitos distintos quando inseridas no concreto (NEVILLE, 2016).

Exemplo disso foi citado por Chindapasirt, Jaturapitakkul e Sinsiri (2007), que avaliaram a influência da finura da cinza volante classe F, na microestrutura e estrutura de poros de pastas de cimento. A cinza volante utilizada foi proveniente da mesma usina, sendo apenas classificada quanto ao tamanho das partículas. As amostras sem e com classificação apresentaram finura medida pelo método Blaine de 300 e 510  $\text{m}^2/\text{kg}$ . Ambas substituíram o cimento nas pastas em teores de 0%, 20% e 40% em massa. A relação água/ligante foi mantida constante em 0,35.

Segundo Chindapasirt, Jaturapitakkul e Sinsiri (2007), os resultados de ensaios de porosimetria por intrusão de mercúrio mostraram que houve redução do tamanho dos poros em ambas as pastas que incorporavam cinza volante com e sem classificação, com resultados mais expressivos para as pastas com cinza volante classificada. O tamanho dos poros também diminuiu com o aumento do teor de substituição do cimento pelas cinzas volantes. As pastas moldadas com a pozolana de maior finura apresentaram maior redução na intensidade de  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  avaliada por difração de raio X e estrutura mais densa em comparação com as pastas incorporando a cinza sem classificação, avaliada por microscopia eletrônica de varredura (MEV).

Diferenças no desempenho de pastas com diferentes cinzas volantes, também foram verificadas por Rivera *et al.* (2015). Pastas foram moldadas com cinzas volantes classe C e F, as quais apresentaram teores de cálcio de 28,5% e 5,87% e perda ao fogo 7,08% e 1,01%, respectivamente, sendo a cinza volante classe C a de maior finura. Neste caso, todas as misturas foram constituídas com relação água/materiais cimentícios (a/mc) de 0,42, com substituições do cimento em volume por ambas as cinzas de 40%, 60% e 80%. Entre as idades de 7 a 28 dias, as pastas com cinza volante classe C, exibiram ganhos de resistência à compressão semelhantes de 1,18 a 1,20 MPa/dia, para os três níveis de substituição. Em contrapartida, o ganho de resistência para as pastas com cinza volante classe F variou largamente de 0,69 a 1,83 MPa/dia.

Entre 28 e 90 dias, Rivera *et al.* (2015) verificaram que as pastas com cinza volante classe C apresentaram ganhos de resistência à compressão de 0,27 a 0,29 MPa/dia, assim como, a pasta com 80% de cinza volante classe F em 0,21 MPa/dia. No entanto, para as pastas com 40% e 60% de cinza volante classe F, os ganhos de resistência foram significativamente inferiores, de 0,07 e 0,08 MPa/dia, respectivamente.

#### 2.1.2.4.2 *Metacaulim*

O metacaulim é uma adição mineral aluminossilicosa obtida pela calcinação de algumas argilas, como as caulíníticas e os caulins de elevada pureza. Quando a caulinita é submetida a temperaturas entre 600°C e 900°C, os íons hidroxila são removidos de sua estrutura cristalina, ocasionando a destruição de seu arranjo atômico. Origina-se, então, a metacaulinita, um componente amorfo de grande instabilidade química responsável pela atividade pozolânica (DAL MOLIN, 2011). Posteriormente, o material calcinado passa por um processo de moagem a um tamanho muito fino de partículas (MEHTA; MONTEIRO, 2014). No Brasil a NBR 15894-1 (2010) especifica os requisitos químicos e físicos do metacaulim para utilização com cimento Portland em concretos, argamassas e pastas.

O emprego do metacaulim no CAA ocasiona o aumento da resistência à segregação (REPETTE, 2011). Além disso, a tendência é de que esta pozolana não contribua na fluidez e aumente o consumo de aditivo superplastificante devido à elevada superfície específica e ao formato normalmente irregular de suas partículas (SILVA, 2008).

Comportamento semelhante ao supracitado foi verificado por Madandoust e Mousavi (2012) e Sfikas, Badogiannis e Trezos (2014) ao avaliarem CAAs com substituições parciais de cimento por metacaulim,

em teores variando de 0% a 20% em massa. Em ambos os casos, o metacaulim diminuiu a fluidez dos CAAs, elevou o tempo de escoamento pelo funil V, indicando aumento da viscosidade, e reduziu a habilidade passante pela caixa L. Tais consequências foram mais acentuadas quanto maior o teor de metacaulim utilizado nas misturas. O bom desempenho quanto à segregação e exsudação dos CAAs incorporando metacaulim também foi relatado.

### 2.1.3 Métodos de dosagem

Salienta-se que, mesmo a ênfase desta pesquisa não ser a avaliação minuciosa de metodologias de dosagem, julgou-se de suma importância uma breve abordagem do assunto, tendo em vista as diferentes possibilidades para obtenção do CAA, assim como, a grande representatividade dos métodos citados em pesquisas relacionadas ao tema.

O método de dosagem Okamura é um dos métodos mais tradicionais em dosagem do CAA. Com seu primeiro protótipo concluído em 1988, a metodologia aborda a fixação do volume de agregado graúdo em 50% do volume de agregados, volume de areia em 40% do volume total de argamassa, dosagens elevadas de aditivo superplastificante e baixa relação água/finos (OKAMURA; OZAWA, 1995<sup>2</sup> *apud* OKAMURA; OUCHI, 2003). Avaliações prévias de espalhamento e viscosidade em argamassas são indicadas para determinar a relação superplastificante/finos e água/finos, em volume, sendo que, após esta definição, o concreto, com o volume fixado de agregado graúdo, também deve ser verificado (OKAMURA; OUCHI, 2003).

Tutikian (2004), ao comentar o método de Okamura, cita a importância do mesmo para a concepção do CAA, além de servir de base para posteriores melhorias nos métodos de dosagem deste material. No entanto, ressalta que a metodologia em questão não deve ser mais aplicada em função da abrangência de seus termos, como dosagens elevadas de superplastificantes e baixas relações a/c. Alencar (2008, p. 59) também destaca que este método “[...] apresenta dosagem baseada em limites superiores de pasta e com proporções de agregados altamente abrangentes.”

---

<sup>2</sup> OKAMURA, H.; OZAWA, K. “Mix-design for self-compacting concrete.” Concrete Library of JSCE, 25, p. 107-120, 1995.

O método de Gomes *et al.* (2002) aplica-se para obtenção de CAA de alta resistência. Sua metodologia baseia-se no conceito de que a viscosidade e a fluidez da pasta comandam a reologia do concreto. Desta forma, pasta e esqueleto granular são avaliados separadamente. Em resumo, o método é executado em três etapas: composição da pasta, onde define-se a relação a/c, teor de filer ou pozolanas em relação a massa do cimento e ponto de saturação do aditivo superplastificante, definição do esqueleto granular através da composição entre agregados graúdos e miúdos que apresentar menor teor de vazios, e, finalmente a seleção do volume de pasta no concreto, partindo-se da premissa de que este é, teoricamente, o teor de vazios entre os agregados e um teor adicional para causar a dispersão dos mesmos. O concreto selecionado será o que apresentar menor volume de pasta atendendo as propriedades de habilidade de preenchimento, habilidade passante e resistência à segregação (GOMES; BARROS, 2009).

Alencar (2008) interpreta que o método de dosagem proposto por Gomes *et al.*, é de difícil aplicabilidade, devido a fixação de valores muito baixos de relações a/c, o que conduz em todos os casos a concretos de altíssimo desempenho. Tutikian (2004) comenta que estas relações a/c normalmente estão em torno de 0,35 e 0,40.

O método de dosagem Repette-Melo (2005) foi desenvolvido para produção de CAA com resistências à compressão desejadas, em função de relações a/c estabelecidas conforme o tipo de cimento utilizado. A partir da relação a/c definida, avalia-se inicialmente a pasta, determinando-se a relação filer/cimento. Em seguida avalia-se o teor volumétrico de agregado miúdo em relação ao volume total de argamassa, variando-se também o teor de aditivo superplastificante. Nesta etapa, teores adicionais de filer podem ser adicionados às argamassas, realizando-se a correção do teor de aditivo. A fase final deste método, refere-se à determinação do volume de agregado graúdo na argamassa, ajustando-se em conjunto o teor de aditivo. O volume de agregado miúdo e graúdo, em argamassa e concreto, respectivamente, será o maior possível, desde que as misturas atendam as características de autoadensabilidade e estabilidade (MELO, 2005).

Fochs (2011) aborda a semelhança nos métodos de dosagem de Gomes *et al.* e Repette-Melo, quanto à avaliação do teor de superplastificante previamente na fase pasta ou pasta e argamassa, e

posteriormente no concreto. No entanto, para Alencar e Helene (2008<sup>3</sup> *apud* Alencar 2008) estes procedimentos em pastas e argamassas são lentos, trabalhosos e não representam o conteúdo ideal de superplastificante, o qual só é conseguido no concreto. Esta afirmação também foi ratificada por Pereira (2010), que ressalta, entretanto, bons resultados relatados para concretos dosados através destas metodologias.

O método de dosagem Tutikian e Dal Molin (2007) também adota a metodologia da determinação do esqueleto granular para obter menor quantidade de vazios, assim como no método de Gomes *et al.* Porém, diferente deste e dos demais métodos citados anteriormente, a avaliação do teor de aditivo ocorre apenas no concreto, o qual é analisado em um traço intermediário (1:m), e mantido constante nas demais misturas desenvolvidas no método, sendo estas, traço rico, médio e pobre.

Em todas as misturas, o teor de argamassa seca não será constante, ficando maior quanto mais rico for o traço. Assim, o que permite que todos os traços sejam considerados da mesma família são o teor de aditivo e as proporções de todos os agregados que não se alteram. Portanto, a única variável desconhecida é a relação a/c. A partir de resultados de propriedades mecânicas, desenvolve-se diagramas de dosagem conforme preconizados pelo método de dosagem para concretos convencionais do Instituto de Pesquisas Tecnológicas (IPT/EPUSP), que admitem cálculos de qualquer CAA desejado dentro da faixa estudada (TUTIKIAN; DAL MOLIN, 2015).

De acordo com Okamura e Ouchi (2003), no CAA, a resistência à compressão necessária não é o ponto de partida para definição da relação a/c, pois, neste caso, a relação água/finos é definida em função da autoadensabilidade. Avanços neste contexto são demonstrados nos métodos de dosagens Repette-Melo (2005) e Tutikian e Dal Molin (2007), que permitem a dosagem em função da resistência desejada, inclusive para padrões normais de aplicação.

Pereira (2010) comenta também que adotar como ponto de partida a fixação inicial da relação a/c ou do teor de superplastificante na dosagem do CAA faz todo sentido, pois as duas variáveis são dependentes havendo necessidade de fixar uma delas.

Ainda, nos métodos de Tutikian e Dal Molin (2007) e de Gomes *et al.* (2002), pode ser abordada a questão do máximo empacotamento

---

<sup>3</sup> ALENCAR, R. S. A.; HELENE, P. R. L. Diseño de la mezcla del hormigón autocompactante por el método brasileño. In: 1er Congreso Español sobre Hormigón Autocompactante. Valencia, Febr., p. 257-266, 2008.

proposto para os agregados que compõem o concreto, visando obter o mínimo de vazios possível. Esta teoria aplicada para CAAs parece não fazer sentido quando se vincula ao fato de que estes concretos apresentam fluidez elevada. Esta característica, de acordo com Romano, Cardoso e Pileggi (2011), é obtida pelo maior espaçamento entre os agregados através de um maior teor de matriz, visto que, para que a movimentação entre tais partículas ocorra facilmente, a distância entre elas deve ser aumentada.

### 2.1.3.1 Método Gtec

A dosagem do CAA apresentada na parte experimental deste trabalho teve como base a metodologia utilizada pelo Grupo de Tecnologia em Materiais e Componentes a Base de Cimento Portland (GTec), da Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC). Definiu-se pela utilização deste método em função do mesmo ser, de certa forma, um apanhado geral de informações úteis e parâmetros mínimos de dosagem para obtenção de CAAs que atendam as propriedades necessárias para caracterizá-lo como tal.

Neste método, segundo Prudêncio Jr. (2016), parte-se da fixação da relação a/c em função da resistência à compressão desejada, assim como a fixação do consumo de água em torno de 190 a 200 L/m<sup>3</sup> de concreto. A partir destes parâmetros iniciais, determina-se o consumo de cimento. Adota-se também a fixação do teor volumétrico de argamassa superior a 60%, estando preferencialmente na faixa de 65% a 75% do volume total de concreto, podendo-se então encontrar o teor volumétrico de agregado graúdo. Determina-se ainda o consumo de filer e agregado miúdo para que o volume de finos (cimento, filer e pulverulento dos agregados) fique próximo a 200 L. Define-se também um teor de superplastificante inicial, em relação a massa do cimento.

A mistura inicial pode ser produzida em argamassadeira ou betoneira, a fim de ajustar os parâmetros de dosagem, como por exemplo, segregação ou exsudação, ocasionadas pela falta de finos, baixo valor de espalhamento decorrente da falta de aditivo e/ou finos, alto tempo de escoamento pelo funil V ou de espalhamento devido à pouca água, e ausência de borbulhamento no concreto fresco em função da viscosidade elevada (PRUDÊNCIO Jr., 2016).

A relação a/c e teor de aditivo são fixados previamente, com posterior correção do aditivo em função do comportamento da mistura no estado fresco. Caso se façam necessários pequenos ajustes, nas proporções de finos, a/c ou aditivo, o volume de argamassa e agregado

gráudo permanecem constantes, ou ainda, pode-se alterar o volume argamassa/agregado gráudo (PRUDÊNCIO Jr., 2016).

### 2.1.3.2 Proporções dos constituintes do CAA

Na Tabela 2, estão apresentados limites típicos de consumos de materiais para composição de CAA, segundo EFNARC (2005).

Tabela 2: Composições típicas do CAA

Constituintes	Massa (kg/m <sup>3</sup> )	Volume (L/m <sup>3</sup> )
Finos	380 - 600	
Pasta		300 - 380
Água	150 - 210	150 - 210
Agregado gráudo	750 - 1000	270 - 360
Areia*	Normalmente 48-55% do total de agregados em peso.	
Relação água/finos		0,85 - 1,10

\* Conteúdo equilibra-se com o volume de outros componentes.

Fonte: (EFNARC, 2005).

Gomes e Barros (2009) citam que baixos volumes de agregados gráudos devem ser utilizados no CAA, estando compreendidos entre 28% e 35% do volume de concreto, com consumos aproximados de 750 a 920 kg/m<sup>3</sup>, sendo estes valores semelhantes ao exposto por EFNARC (2005). Repette (2011) aborda limites semelhantes, entre 25% e 35%. Referente aos agregados miúdos, Melo (2005) e Gomes e Barros (2009) mencionam volumes compreendidos entre 40% e 50% do volume de argamassa.

Em CAAs que incorporam finos (frações de materiais com partículas inferiores a 0,075 mm) e materiais utilizados no concreto convencional, o teor de cimento normalmente varia de 350 a 450 kg/m<sup>3</sup> e consumo de finos entre 150 a 250 kg/m<sup>3</sup> (REPETTE, 2011). Para Gomes e Barros (2009), o consumo de cimento varia de 200 a 450 kg/m<sup>3</sup>, dependendo das proporções de adições reativas ou inertes, quando utilizadas, sendo que, em dosagens inferiores a 300 kg/m<sup>3</sup>, materiais com propriedades cimentantes, como a cinza volante ou escória, devem ser incluídas no concreto.

### 2.1.4 Resistência à compressão e módulo de elasticidade

As propriedades mecânicas do CAA no estado endurecido refletem as proporções de seus materiais constituintes, da mesma forma como ocorre em concretos convencionais vibrados (TUTIKIAN; DAL MOLIN, 2015). Agregados com menores dimensões, maior quantidade

de finos e uso de aditivo superplastificante, tendem a alterar o desenvolvimento de propriedades como resistência à compressão e módulo de elasticidade (MARQUES, 2011).

Felekoğlu, Türkel e Baradan (2007) verificaram em CAAs com o mesmo consumo de cimento que, ao reduzir a relação a/c, obteve-se uma maior resistência à compressão, para 1, 7 e 28 dias de idade. Nesta avaliação, a relação a/c variou de 0,6 a 0,37, sendo que, quanto menor a quantidade de água, maior foi o teor de aditivo superplastificante a base de policarboxilato adicionado às misturas. O CAA com relação água/ligante semelhante ao concreto convencional vibrado geralmente apresenta resistência à compressão ligeiramente maior, devido à ausência de vibração, que favorece uma melhor interface entre o agregado e pasta endurecida (EFNARC, 2005). Segundo Repette (2011), esta interface apresenta maior homogeneidade devido à ação dos aditivos superplastificantes, que proporcionam melhor dispersão das partículas de cimento.

Além disso, Domone (2007) aborda a questão de que o CAA, por ser normalmente constituído pela combinação de finos (cimento e adições), por consequência terá sua resistência à compressão regulada tanto pela relação água/finos, quanto pelo tipo e proporção da adição utilizada.

Quanto ao módulo de elasticidade do concreto, que é um material heterogêneo e multifásico, o mesmo é influenciado pela fração volumétrica, massa específica e o módulo de deformação dos principais componentes, além das características da zona de transição na interface (MEHTA; MONTEIRO, 2014).

Agregados de massa específica usual apresentam módulo de elasticidade mais elevado do que o da pasta de cimento hidratado. Deste modo, quanto maior o teor de agregados, mais elevado será o módulo de elasticidade do concreto para determinada resistência à compressão. Normalmente o CAA apresenta menor módulo de elasticidade em relação ao concreto convencional vibrado, sendo esta tendência atribuída à menor quantidade de agregado graúdo, a menor dimensão máxima do agregado utilizado e ao aumento do conteúdo de pasta na mistura (FELEKOĞLU; TÜRKEL; BARADAN, 2007), ou ainda, dependendo da situação, devido a maior porosidade (LIU, 2010).

Estas reduções, segundo Domone (2007), podem ser de até 40% para concretos de baixa resistência à compressão, em torno de 20 MPa, e até menores que 5% para concretos com elevada resistência, de 90 a 100 MPa, concordando com Repette (2011), que cita a influência da

dosagem e classe de resistência à compressão do concreto, na redução do módulo de elasticidade do CAA.

Parra, Valcuende e Gómez (2011) compararam CAAs e concretos vibrados com relações a/c de 0,65 e 0,55, ambos com cimento de classe de resistência à compressão de 32,5 MPa, e concretos com relações a/c 0,55 e 0,45, porém com cimento de classe de 42,5 MPa. Todas as misturas continham volumes semelhantes de água. Assim, o consumo de cimento foi diferente em cada traço, porém constante para concretos de mesma relação a/c. O mesmo ocorreu com o agregado gráudo calcário utilizado, o qual apresentava dimensão máxima de 12 mm. Diferentes teores de filler calcário e aditivo à base de policarboxilato foram utilizados a fim de atender as propriedades no estado fresco de cada tipo de concreto. Corpos de prova cilíndricos de 15 cm de diâmetro e 30 cm de altura foram moldados e curados em câmara úmida a 20°C, até as idades de avaliação da resistência à compressão e módulo de elasticidade, que ocorreram aos 7, 28 e 90 dias.

De acordo com Parra, Valcuende e Gómez (2011), os resultados encontrados não revelaram diferenças estatisticamente significativas entre os dois concretos, porém houve uma tendência de redução média em aproximadamente 2% nos valores de módulo de elasticidade dos CAAs em comparação aos concretos vibrados. Este efeito, segundo os autores, é explicado em função do maior conteúdo de pasta, que foi de 5,50%, 4,17% e 2,85% nos CAAs, de relação a/c 0,65, 0,55, e 0,45, respectivamente, uma vez que a rigidez das pastas pode ter sido inferior à dos agregados utilizados. Para relações a/c menores, além da redução do teor de pasta, a maior resistência à compressão diminuiu ainda mais a diferença no módulo de elasticidade dos concretos.

## 2.2 CONCRETO MASSA

Em elementos massivos, o calor produzido pela hidratação do cimento e as condições normalmente baixas de dissipação do concreto, resultam em grandes elevações de temperatura em poucos dias após o lançamento (MEHTA; MONTEIRO, 2014). Em função desta geração de calor significativa, ocorre também o aumento do volume do elemento de concreto, com posterior tendência ao resfriamento até atingir a temperatura ambiente. Quando há restrição ao movimento durante o processo de redução da temperatura, um panorama importante de tensões pode ocorrer, gerando fissuração (MARQUES FILHO, 2011).

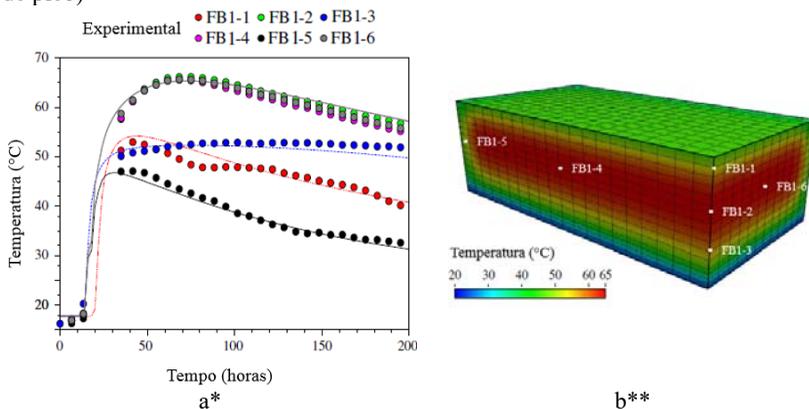
Nos elementos volumosos, a temperatura se eleva no centro do concreto, deixando-o praticamente em condições adiabáticas. Assim, um

gradiente de temperatura ocorre entre o centro e as superfícies de troca de calor da estrutura, que se traduz em retração térmica diferencial. Este gradiente é acentuado, pois, no resfriamento, a temperatura das superfícies diminui muito mais rápido que no centro do concreto. A região superficial do elemento é então submetida a elevadas tensões de tração (retração impedida), enquanto o centro está sob compressão, resultando em gradientes de tensão e consequente fissuração superficial, se a tensão de tração na pele do concreto, for superior à sua resistência à tração (ACKER; TORRENTI; GUÉRINET, 2014).

Apesar de existirem outros fatores que influenciam na fissuração térmica, como grau de restrição, coeficiente de dilatação térmica do concreto e sua capacidade de deformação na tração (NEVILLE; BROOKS, 2013), ênfase é dada para a influência da temperatura.

A distribuição da temperatura, ou o gradiente de temperatura em grandes elementos, pode ser exemplificada, de forma geral, através dos dados apresentados por Silva, Šmilauer e Štemberk (2015), os quais acompanharam a elevação da temperatura em um bloco de fundação, com 511 m<sup>3</sup> de concreto. A Figura 1 apresenta as curvas de elevação de temperatura em cada região avaliada, assim como, uma simulação da distribuição da temperatura de pico em diferentes pontos do bloco.

Figura 1: Resultados encontrados no bloco de 511 m<sup>3</sup>: a) evolução da temperatura; b) simulação da distribuição da temperatura em 74 h (temperatura de pico)



\* Linhas que formam as curvas de evolução da temperatura representam simulações realizadas através do método de elementos finitos (não abordado neste trabalho).

\*\* Representação dos pontos verificados a um quarto do bloco de concreto.

Fonte: adaptada de Silva, Šmilauer e Štemberk (2015).

Percebe-se que, para regiões centrais, a temperatura é maior que próximo às regiões superficiais do bloco. A temperatura máxima foi verificada nos pontos 2, 4 e 6 (região central), apresentando nestas situações em torno de 65°C em 74 h. O concreto utilizado apresentava aproximadamente 420 kg/m<sup>3</sup> de cimento CP IV-RS (SILVA; ŠMILAUER; ŠTEMBERK, 2015).

Estudos têm demonstrado que a fissuração superficial pode ser minimizada ou evitada quando a diferença máxima de temperatura entre o interior e a superfície do concreto for limitada a menos de 20°C (KOSMATKA; KERKHOFF; PANARESE, 2003<sup>4</sup> *apud* SILVA; ŠMILAUER; ŠTEMBERK, 2015).

Além disso, Gadja e Vangeem (2002) citam que a temperatura máxima que determinado concreto pode atingir é normalmente especificada a fim de evitar danos ao concreto, como por exemplo, o comprometimento da durabilidade através da formação de etringita tardia. Mehta e Monteiro (2014) relatam que a etringita primária formada na hidratação do cimento é instável acima de 65°C, sendo decomposta para formar monossulfato hidratado. Os íons sulfato liberados na decomposição são adsorvidos pelo silicato de cálcio hidratado e, quando desorvidos, formam a etringita tardia. Segundo Carles-Gibergues e Hornain (2014), este ataque por sulfatos de origem interna ocorre normalmente depois de longos períodos e podem, em algumas situações, provocar expansão e fissuração do concreto, na presença de umidade. No entanto, os parâmetros para formação da etringita tardia são numerosos e interdependentes. Deste modo, além da temperatura de aquecimento do concreto, deve-se considerar também o tempo de manutenção da temperatura máxima, a composição química do cimento e a dosagem do concreto, a qual determina o teor de cimento e o uso eventual de adições.

Em grandes elementos de concreto, a elevação de temperatura é muito mais importante do que a taxa de liberação de calor. A primeira situação é mais dependente do calor total desenvolvido em função do maior autoisolamento, enquanto na segunda situação, o calor é constantemente dissipado (NEVILLE; BROOKS, 2013). Como a preocupação principal deste tipo de estrutura é um produto final sem fissuração, esforços para controlar a elevação da temperatura são feitos

---

<sup>4</sup> KOSMATKA, S.; KERKHOFF, B.; PANARESE, W. Design and control of concrete mixtures, 14th edn. Portland Cement Association, Skokie, 2003.

desde a seleção dos materiais, dosagens, condições de cura e práticas de construção adequadas (MEHTA; MONTEIRO, 2014).

Dentre as possibilidades, pode-se utilizar cimentos de baixo calor de hidratação, como aqueles com adições de escória de alto forno moída ou pozolanas, como a cinza volante. Cimento com mais aluminato tricálcico ( $C_3A$ ) e silicato tricálcico ( $C_3S$ ), apresentam maior calor de hidratação comparados àqueles com menores quantidades destes compostos. Da mesma forma, quanto mais fino for o cimento, maior o calor liberado, devido a maior superfície específica e a maior reatividade de partículas menores (SANTOS; BITTENCOURT; GRAÇA, 2011; MEHTA; MONTEIRO, 2014). Neville e Brooks (2013), afirmam, entretanto, que a finura do cimento afeta apenas a taxa de liberação e não o calor total liberado, sendo este comandado pela quantidade de cimento.

A redução do consumo de cimento é um meio bastante eficaz para redução da temperatura do concreto, que pode ser feito através de substituições parciais de cimento por pozolanas, conforme discutido adiante, e com o uso de aditivos químicos redutores de água, visto que, para uma menor quantidade de água, menor a quantidade de cimento necessária para mesma relação a/c (MEHTA; MONTEIRO, 2014).

Práticas construtivas também estão entre as opções para redução do calor do concreto massa, como realizar a pré-refrigeração do concreto, através do uso parcial ou total de gelo em substituição à água de amassamento, e refrigerar os agregados (FURNAS, 1997). Neville e Brooks (2013) citam que é possível se alcançar temperaturas iniciais de até  $7^{\circ}C$  no concreto fresco. Santos, Bittencourt e Graça (2011) abordam a questão de concretagens noturnas, onde, além dos materiais, a temperatura do ambiente também está mais baixa, sendo todos estes fatores relevantes para redução do gradiente de resfriamento do concreto. Deve-se estudar também, alturas máximas de concretagem e intervalos de lançamento, tentando sempre minimizar a elevação da temperatura no centro do concreto.

Outra prática utilizada é a pós-refrigeração através de tubulações embutidas no concreto, por onde circula água refrigerada ou em temperatura ambiente (FURNAS, 1997). Este procedimento, todavia, pode apresentar altos custos iniciais e operacionais (GADJA; VANGEEM, 2002). Neville e Brooks (2013) citam ainda a isolamento das superfícies do concreto, incluindo a parte superior, para minimização dos gradientes de temperatura.

É evidente que a redução do consumo de cimento, sem comprometer as expectativas de desempenho do elemento estrutural, é

uma forma eficaz e possivelmente dentre as menos onerosas para minimização dos efeitos gerados pela sua hidratação. Sendo assim, a aplicação de concretos com elevados teores de cinza volante pode ser uma alternativa viável (ATIS, 2002).

Deste modo, como este trabalho busca aliar a aplicação de CAA em elementos massivos, atrelando a utilização de cinza volante e dosagens moderadas de cimento, busca-se como ponto de partida um melhor entendimento de concretos com elevados teores de cinza volante, conforme descrito a seguir.

### 2.3 CONCRETOS COM ELEVADOS TEORES DE CINZA VOLANTE

O concreto com elevado teor de cinza volante, conhecido como *high-volume fly ash (HVFA) concrete*, foi desenvolvido em 1985, pelo Centro Canadense de Tecnologia Mineral e de Energia (CANMET), para atender características como baixo calor de hidratação, resistência à compressão suficiente em idades iniciais, alta resistência à compressão e módulo de elasticidade em idades avançadas. O objetivo de utilização deste concreto era justamente a execução de uma estrutura de concreto massa sem fissuras (SIVASUNDARAM; CARETTE; MALHOTRA, 1990).

Este concreto apresentava particularidades como a substituição do cimento por cinza volante classe F, variando de 54% a 58% em massa, consumo de cimento aproximado de 150 kg/m<sup>3</sup> e relação a/mc (cimento e cinza volante) em torno de 0,30, resultando na utilização de grandes dosagens de aditivo superplastificante para atingir a trabalhabilidade desejada (MALHOTRA, 1990).

Dentre os primeiros estudos realizados, cita-se o de Sivasundaram, Carette e Malhotra (1990), que avaliaram a elevação da temperatura, o desenvolvimento da resistência à compressão e o módulo de elasticidade a longo prazo de um bloco de concreto cúbico de 1,5 m de lado. O concreto foi produzido no ano de 1985, com 147 kg/m<sup>3</sup> de cimento, 187 kg/m<sup>3</sup> de cinza volante classe F, agregado graúdo calcário, areia natural, aditivo incorporador de ar e superplastificante, e relação água/ligante de 0,28. Os constituintes para execução do concreto foram pré-resfriados a 12°C. Após a moldagem, o bloco permaneceu em ambiente com temperatura de 24°C, e apresentou elevação de temperatura máxima de 31,3°C em 48 h, verificada no centro do volume do bloco de concreto.

Através de ensaios em corpos de prova cilíndricos, moldados e extraídos posteriormente do bloco de concreto, Sivasundaram, Carette e Malhotra (1990), verificaram que a resistência à compressão aumentou até 1 ano e meio de idade, atingindo aproximadamente 70 MPa. Avaliações realizadas aos 2 e 3 anos e meio de idade comprovaram que não houve mais ganhos na resistência à compressão. Resultado semelhante foi apurado nos concretos com grandes teores de cinza volante, avaliados por Hansen (1990), os quais foram curados a 20°C, e não apresentaram ganhos de resistência à compressão no período acima de 3 anos e meio de idade.

De acordo com Sivasundaram, Carette e Malhotra (1990), até a idade de 91 dias o desenvolvimento da resistência à compressão ocorreu tanto em função da ação pozolânica, quanto ao efeito de enchimento proporcionado pelas partículas da cinza volante. Posteriormente, a evolução ocorreu somente em função da ação pozolânica da cinza. Os valores de módulo de elasticidade foram considerados elevados, sendo de 38,8 GPa em 91 dias e 47,0 GPa aos 2 anos.

Giaccio e Malhotra (1988), também investigaram concretos com alto teor de cinza volante, com consumo de cimento de 154 kg/m<sup>3</sup>. Os concretos foram moldados com relação água/ligante (0,32 ± 0,01), e percentual de cinza volante classe F, em relação ao total de ligante, em torno de 56%. Todas as misturas foram efetuadas com agregado graúdo calcário e areia natural, aditivo incorporador de ar e superplastificante. Concretos com diferentes combinações de tipo de cimento (tipo I com 48,7% e tipo III com 53,3% de C<sub>3</sub>S), cinza volante sem e com beneficiamento (partículas ≤ 45µm), e sílica ativa (2,8% em relação ao total de ligante) foram moldados.

Quanto aos valores de resistência à compressão em corpos de prova cilíndricos, Giaccio e Malhotra (1988) verificaram que, aos 91 dias de idade, os concretos com ambos os tipos de cimento, cinza volante sem beneficiamento, e com presença ou não de sílica, apresentaram valores de resistência à compressão semelhantes, em aproximadamente 40 MPa. No entanto, para esta mesma idade, as amostras que faziam uso de cinza volante beneficiada apresentaram valores significativamente maiores, em aproximadamente 48 MPa, com utilização de cimento tipo III.

Os valores de módulo de elasticidade obtidos aos 28 dias, apenas para os concretos que utilizavam o cimento tipo I, ficaram em torno de 35 GPa, sendo que os valores de resistência à compressão destes concretos não ultrapassaram 33,3 MPa, nesta mesma idade. Estes bons resultados foram atribuídos ao efeito de densificação das partículas

de cinza volante no concreto, pois, até 28 dias, ocorre pouca reação pozolânica entre a cinza volante e o cimento Portland (CARETTE; MALHOTRA, 1986<sup>5</sup> *apud* GIACCIO; MALHOTRA, 1988).

## 2.4 CONCRETOS AUTOADENSÁVEIS COM ELEVADOS TEORES DE CINZA VOLANTE

O CAA tem ampla aplicação na concretagem de peças com elevada densidade de armaduras ou com condições de moldagem difíceis. Nestas aplicações, o CAA deve apresentar elevada fluidez e boa coesão, propriedades que podem ser obtidas pela presença de finos, como a cinza volante (BOUZOUBAË; LACHEMI, 2001). Além disso, frequentemente, este tipo de concreto é produzido com grande quantidade de materiais finos, necessários para manter uma tensão de escoamento suficientemente baixa para que o concreto escoe, e uma viscosidade plástica relativamente alta para evitar a segregação (SUAIAM; MAKUL, 2014).

Complementarmente, e de forma geral, a adição de materiais finos no CAA proporciona melhorias, pois atuam como pontos de nucleação quebrando a inércia do sistema, fazendo com que as reações das partículas do cimento com a água ocorram de forma mais rápida, resultando em ganhos de resistência nas primeiras idades, melhorando a zona de transição e dificultando a penetração de agentes externos agressivos (TUTIKIAN; DAL MOLIN, 2015).

Obviamente que atenção especial deve ser dada aos efeitos proporcionados pelos teores de adições incorporados nas misturas, em função dos resultados esperados para determinada aplicação do CAA, neste caso, em especial, quando da utilização de teores elevado de cinza volante.

Desta forma, a seguir estão apresentadas pesquisas relacionadas com aplicação de grandes teores de cinza volante em pastas, argamassas, CAA e até mesmo concreto convencional vibrado, a fim de relacionar pontos específicos sobre os possíveis efeitos deste tipo de mistura, quanto ao desenvolvimento do calor de hidratação, características de autoadensabilidade, resistência à compressão e módulo de elasticidade em CAAs. Aborda-se ainda alguns aspectos referentes à utilização de ligantes ternários em misturas cimentícias,

---

<sup>5</sup> CARETTE, G. G.; MALHOTRA, V. M. Characterization of Canadian Fly Ashes and their Relative Performance in Concrete. CANMET Report 86-6E, Energy, Mines and Resources Canada, Ottawa, 1986.

especialmente os compostos por cimento, elevados teores de cinza volante e metacaulim.

### **2.4.1 Influência nos parâmetros de autoadensabilidade**

De forma genérica e sob a visão microestrutural/reológica, os concretos podem ser apresentados como suspensões bifásicas heterogêneas em seu estado fresco, com comportamento reológico de alta complexidade, que está vinculado com a distribuição espacial das partículas de cada fase com o meio líquido que as afasta (ROMANO; CARDOSO; PILEGGI, 2011). A pasta é o meio de transporte dos agregados. Desta forma, todas as partículas de agregados miúdos devem ser recobertas e lubrificadas por uma camada de pasta, a qual deve apresentar volume maior que os vazios entre os grãos, aumentando a fluidez e reduzindo a fricção entre eles. O mesmo raciocínio pode ser utilizado para a argamassa em relação ao agregado graúdo no concreto (EFNARC, 2005).

A pasta deve apresentar coesão e viscosidade para promover os efeitos necessários ao CAA. Sendo ambas propriedades provenientes dos fenômenos de superfície dos finos, a incorporação de adições minerais com diâmetro médio menor ou semelhante ao do cimento, afetam estas características (DAL MOLIN, 2011).

Deste modo, a substituição de cimento por partículas normalmente esféricas de cinza volante pode influenciar diretamente as características de autoadensabilidade no CAA, através da redução do atrito entre partículas do cimento e entre as partículas de cinza volante (SUA-IAM; MAKUL, 2014). Assim, quando cimento é substituído pela cinza volante, a fluidez tende a aumentar (CELIK *et al.*, 2014; SUA-IAM; MAKUL, 2014). Entretanto, de acordo com EFNARC (2005), teores elevados desta adição podem produzir pastas muito coesivas com consequente resistência ao fluxo.

A seguir, encontram-se alguns parâmetros observados em pesquisas com substituição do cimento por cinza volante em CAAs, iniciando com estudos que adotaram substituições em massa, seguido daqueles com substituições em volume. Ressalta-se que relação a/mc refere-se as misturas binárias de cimento e cinza volante, ou no caso de misturas ternárias onde outra adição, além da cinza volante, foi utilizada. O mesmo ocorre ao tratar-se de relação água/ligante.

CAAs com teores de 40%, 50% e 60% de cinza volante classe F em substituição ao cimento, foram avaliados por Bouzoubaâ e Lachemi (2001). Para cada teor de pozolana, três relações a/mc foram testadas,

sendo estas, 0,45, 0,40 e 0,35. Em todos os CAAs, foram utilizados aditivos incorporador de ar e superplastificante formaldeído-sulfonato de naftaleno. As misturas apresentaram consumo de materiais cimentícios de 400 kg/m<sup>3</sup> e proporções de 50% em massa, para agregados miúdo e gráudo, este último com teor volumétrico de 32% do concreto. A superfície específica do cimento e cinza volante foi de 407 e 306 m<sup>2</sup>/kg, respectivamente. Características no estado fresco podem ser visualizadas na Tabela 3.

Tabela 3: Propriedades no estado fresco de CAAs com diferentes relações a/mc e teores de cinza volante

% substituição (massa)	Relação a/mc	Espalhamento (mm)	Funil V (s)	Exsudação (ml/cm <sup>2</sup> )
40	0,45	625	3	0,117
50		520	3	0,129
60		450	3	0,127
40	0,40	625	4	0,082
50		570	5	-
60		600	3	-
40	0,35	650	7	0,025
50		540	6	-
60		650	4	-

Fonte: adaptada de Bouzoubaâ e Lachemi (2001).

Bouzoubaâ e Lachemi (2001) concluíram que o espalhamento foi mais influenciado pela dosagem de superplastificante do que pelos teores de cinza volante ou relações a/mc utilizadas. No entanto, a dosagem do superplastificante foi mais elevada quanto menor a relação a/mc, assim como quanto menor o teor de cinza volante utilizado. A viscosidade aparente foi diretamente influenciada pela redução na relação a/mc. Segundo os autores, a exsudação aumentou com o aumento da relação a/mc, sendo que, o aumento do percentual de cinza volante não influenciou significativamente.

Yazici (2008) também determinou parâmetros para o estado fresco de CAAs com cinza volante, os quais podem ser visualizados na Tabela 4.

Tabela 4: Características no estado fresco dos CAAs, em função do teor de cinza volante

% substituição (massa)	Relação a/mc	Aditivo superplastificante (L/m <sup>3</sup> )	Espalhamento (mm)	Tempo de espalhamento T <sub>500</sub> (s)
0	0,28	7,98	710	3,5
30		13,02	785	3,5

40	19,98	750	4,5
50	20,40	800	5,0
60	22,02	780	7,5

Fonte: adaptada de Yazici (2008).

Yazici (2008) avaliou CAAs com substituição do cimento por cinza volante Classe C, nas proporções indicadas na Tabela 4, com utilização de aditivo superplastificante à base de policarboxilato em diferentes teores para cada traço. O cimento utilizado com superfície específica Blaine de 339 m<sup>2</sup>/kg era mais fino que a cinza volante, a qual apresentou finura de 290 m<sup>2</sup>/kg. A viscosidade plástica dos CAAs, avaliados indiretamente pelo tempo de escoamento T<sub>500</sub>, aumentou com o aumento do teor de cinza volante. Além disso, quanto maior o teor de cinza volante utilizado mais elevada foi a dosagem de superplastificante para manter a fluidez dos CAAs. Este comportamento possivelmente ocorreu em função do maior volume de pasta proporcionado pela adição em massa de cinza volante. Todavia, segundo Yazici (2008), apesar das dosagens elevadas de superplastificante em algumas misturas, avaliações visuais indicaram ausência de segregação e exsudação nos CAAs.

Segundo Neville (1995<sup>6</sup> *apud* YAZICI, 2008), o aumento na quantidade de aditivo em misturas incorporando cinza volante, pode ser também devido à presença de carbono não queimado. Este se apresenta normalmente sob a forma de partículas celulares maiores que 45 µm, aumentando a demanda de água para dada consistência do concreto (ATIS, 2005; MEHTA; MONTEIRO, 2014). Desta forma, na avaliação de Yazici (2008), como a relação a/mc foi constante, o aumento dos teores de cinza volante, com conseqüente acréscimo nos níveis de carbono, pode ter influenciado no maior consumo de aditivo.

No entanto, Nehdi, Pardhan e Koshowski (2004) verificaram reduções na dosagem de aditivo superplastificante formaldeído-sulfonato de naftaleno de aproximadamente 21%, em CAAs com 50% em peso de cinza volante classe F substituindo o cimento, comparando ao CAA de 100% de cimento. Comportamento semelhante ocorreu para misturas ternárias de 50% de cimento, 25% de cinza volante e 25% de escória granulada de alto forno, onde a redução do superplastificante foi de 31%, em relação ao traço sem adições. A superfície específica dos materiais cimentícios era de 412, 280 e 468 m<sup>2</sup>/kg, respectivamente para cimento, cinza volante e escória. A relação a/mc de 0,38 foi constante

<sup>6</sup> Neville AM. Properties of concrete. New York: Longman; 1995.

em todas as misturas. Os valores de espalhamento obtidos ficaram na faixa de 615 mm a 690 mm.

Quanto ao aumento na viscosidade dos CAAs relatados por Yazici (2008), parece que este desempenho não é assumido como regra, quando a substituição do cimento pela cinza volante é realizada em massa.

Ng e Justnes (2016) comentam que, devido à menor massa específica da cinza volante e o consequente aumento do volume de pasta para mesma relação a/mc, espera-se que a viscosidade das misturas com cinza volante aumente. Entretanto, o aumento na fração volumétrica de sólidos pode ser ofuscado pelo efeito da forma esférica das partículas desta pozolana, que reduzem a resistência ao escoamento destas misturas.

Celik *et al.* (2015) avaliaram a influência da substituição do cimento por cinza volante Classe F, em CAAs com relação a/mc de 0,35 e relação agregados (50% grão e 50% miúdo) para ligante de 4:1 (em massa). Aditivo superplastificante à base policarboxilato também foi utilizado nas misturas. Os valores de espalhamento e tempos de escoamento  $T_{500}$ , encontrados para os percentuais de substituição do cimento de 0%, 30% e 50%, foram de 584 mm, 610 mm e 660 mm e 4,5 s, 4,5 s e 3,8 s, respectivamente.

A influência da cinza volante foi relacionada com a redução no tempo de escoamento  $T_{500}$ , e aumento crescente do diâmetro de espalhamento em relação ao traço padrão, conforme maior o teor de cinza. Segregação e exsudação foram verificadas qualitativamente através dos índices de estabilidade visual, conforme a ASTM C1611, sendo obtidos resultados entre 0 e 1 (CELIK *et al.*, 2015).

Güneyisi *et al.* (2015) avaliaram o comportamento de CAAs em misturas com substituição do cimento por cinza volante em percentuais de 0%, 25%, 50% e 75%, sendo que, em cada série, foram avaliados também os efeitos da substituição de cimento por nanosilica em teores de 0%, 2%, 4% e 6% em peso. O consumo de ligante de 570 kg/m<sup>3</sup> e relação a/mc 0,33 foram constantes em todas as misturas, com utilização de aditivo superplastificante a base de éter policarboxilato para atender valores de espalhamento de (750 ± 50) mm.

O CAA sem adições e as misturas binárias com 25%, 50% e 75% de cinza volante apresentaram valores de espalhamento de 735 mm, 760 mm, 770 mm e 790 mm, respectivamente, com redução no teor de aditivo utilizado em função do aumento na dosagem de cinza volante. Em contrapartida, nas séries com nanosilica, houve reduções nos diâmetros de espalhamento, mesmo com aumento no teor de

superplastificante, sendo possivelmente decorrente da grande área específica desta adição, que aumenta a demanda de água no concreto (GÜNEYISI *et al.*, 2015).

Os CAAs produzidos por Güneyisi *et al.* (2015) apresentaram tempos de espalhamento  $T_{500}$  de 3,7 s, 2,7 s, 2,1 s e 1,4 s, para teores de cinza volante de 0%, 25%, 50% e 75%, respectivamente. A mesma tendência foi observada nos tempos de escoamento pelo funil V, onde o menor valor foi o da mistura com 75% de cinza volante. A habilidade passante das misturas, avaliada no ensaio de caixa L, demonstrou relações  $H_2/H_1$  igual a 1 para os CAAs apenas com cinza substituindo o cimento. A adição de nanosílica resultou em CAAs mais coesos e viscosos, sendo que, quanto maior o teor de nanosílica, maiores os tempos de escoamento  $T_{500}$  e funil V, para todos os teores de cinza volante utilizados.

Segundo De La Varga *et al.* (2012), em muitos casos, a substituição do cimento pela cinza volante é feita em massa, porém em função das diferenças significativas dos pesos específicos destes materiais, o volume de pasta total acaba sendo alterado, podendo influenciar diretamente sobre várias propriedades do concreto. Alterações desta natureza, podem ser evitadas quando as substituições com cinza volante são feitas em volume.

Esta última metodologia foi abordada por Liu (2010) que desenvolveu CAAs com substituição de cimento por cinza volante em teores de 0% a 100%, sendo que, em todas as misturas o volume de areia na argamassa foi de 45% e a relação de agregado graúdo no concreto de 35,5%. Todos os CAAs foram produzidos com as mesmas propriedades no estado fresco, com espalhamentos de  $(700 \pm 50)$  mm, tempos de escoamento no funil V de  $(8,0 \pm 3,0)$  s e índice segregação inferior a 15%. Para isso, a relação a/mc, assim como o teor de aditivo superplastificante a base policarboxilato foram variáveis em cada mistura.

Para manter a habilidade de preenchimento constante, foi necessário reduzir o consumo de água e aditivo superplastificante, conforme exposto na Tabela 5.

Tabela 5: Características no estado fresco dos CAAs com relação a/mc e teores de aditivo variáveis

% substituição (volume)	Consumo de mc ( $\text{kg}/\text{m}^3$ )	Consumo de água ( $\text{kg}/\text{m}^3$ )	Consumo de aditivo ( $\text{kg}/\text{m}^3$ )	Espalhamento (mm)	Funil V (s)
0	539	178	5,93	720	8,1

20	517	176	4,65	700	8,1
40	495	173	3,71	705	6,1
60	472	170	3,21	715	6,3
80	451	167	2,93	730	7,2
100	439	158	1,98	715	9,1

Fonte: adaptada de Liu (2010).

A redução no teor de aditivo superplastificante para teores mais elevados de cinza volante pode ser devido à atuação da cinza como lubrificante na mistura, não interagindo com o aditivo e produzindo uma força repulsiva. Assim, o superplastificante atua apenas sobre o cimento (WATTANALAMLERD; OUCHI, 2005<sup>7</sup> *apud* LIU, 2010). Ou ainda, a forma esférica da cinza volante pode atuar facilitando a movimentação dos agregados, reduzindo o atrito interno entre eles e destes com as partículas de cimento, desta forma, aumentando a fluidez das misturas, com teores menores de superplastificante (REPETTE, 2011).

Efeitos negativos na habilidade passante, verificados através do ensaio de anel J, foram detectados por Liu (2010). Como esta característica é dependente do conteúdo de agregado graúdo e viscosidade da pasta, o menor volume de água, dosagem de superplastificante inferior do que no CAA referência, combinados com o aumento no teor de cinza volante, levaram ao acréscimo da viscosidade, visto que, o conteúdo de agregado graúdo foi constante. Melhorias na resistência à segregação para os CAAs com 80% e 100% de cinza volante, foram verificadas, possivelmente devido a viscosidade mais elevada destes CAAs.

No estudo realizado por Sua-iam e Makul (2014), a cinza volante Classe F foi utilizada em teores de 0% a 60%. A superfície específica Blaine da pozolana era de 480 m<sup>2</sup>/kg, enquanto o cimento apresentava 610 m<sup>2</sup>/kg. A dosagem de aditivo superplastificante, à base de policarboxilatos, sobre a massa de ligante foi de 1,20% em todas as misturas, assim como os consumos de agregado graúdo e miúdo foram constantes em todos os CAAs. A relação água/ligante foi ajustada para proporcionar espalhamentos de (700 ± 25) mm, e refletiu em uma redução de água com o aumento do teor de cinza volante (Tabela 6), que pode ter sido proveniente da menor área específica da pozolana em comparação a do cimento.

<sup>7</sup> WATTANALAMLERD, C.; OUCHI, M. Flowability of fresh mortar in self-compacting concrete using fly ash. In: YU, Z.; SHI, C.; KHAYAT, KH.; XIE, Y. editors. Paris: RILEM Publication SARL; p. 261-70, 2005.

Tabela 6: Características no estado fresco dos CAAs com relações a/mc variáveis e teor de aditivo constante

% substituição (volume)	Consumo de mc (kg/m <sup>3</sup> )	Relação a/mc	Espalhamento (mm)	T <sub>500</sub> (s)	Funil V (s)
0	550	0,25	720	3	10
20	519	0,22	700	4	10
40	488	0,22	720	4	9
60	457	0,19	700	4	9

Fonte: adaptada de Sua-iam e Makul (2014).

O tempo de espalhamento T<sub>500</sub> aumentou para misturas com cinza volante, conforme apresentado na Tabela 6, que segundo Barbhuiya (2011<sup>8</sup> *apud* SUA-IAM; MAKUL, 2014), resultou de um melhor empacotamento granulométrico proporcionado pela cinza volante, o que assegura maior coesão. Em oposição, o tempo de escoamento pelo funil V diminuiu, com aumento da incorporação de cinza volante, sendo este desempenho, de acordo com os autores, decorrente da forma esférica e textura lisa da cinza utilizada, que aumentou a quantidade de água livre e a consequente trabalhabilidade do CAA. A avaliação da habilidade passante ocorreu pelo teste de anel J, conforme ASTM C 1621, onde foi verificado que o bloqueio diminuiu com o aumento dos teores de cinza volante, sendo também justificado pela melhor coesão dos CAAs.

#### 2.4.1.1 Desempenho com utilização de metacaulim

Diferente do que se observa na maioria das abordagens quanto a utilização de cinza volante em CAAs, na aplicação do metacaulim em substituição ao cimento a tendência é a redução da fluidez e o aumento da viscosidade das misturas, conforme relatado anteriormente. Entretanto, em misturas ternárias de cimento, cinza volante e metacaulim um comportamento intermediário ocorre, com os efeitos de uma adição compensando os efeitos da outra (GÜNEYISI; GESOĞLU, 2008).

Güneyisi, Gesoğlu e Özbay (2010) produziram CAAs com esta configuração de mistura ternária. A Tabela 7 apresenta o consumo de aditivo superplastificante utilizado para manter o espalhamento na faixa

<sup>8</sup> BARBHUIYA, S. Effects of coal fly ash and dolomite powder on the properties of self-consolidating concrete. *Construction and Building Materials*, 25 (8), p. 3301-3305, 2011.

de  $(700 \pm 30)$  mm dos CAAs e valores de ensaios de caracterização. Todas as misturas foram desenvolvidas com relação a/mc de 0,32 e 550 kg/m<sup>3</sup> de ligante.

Tabela 7: CAAs com cinza volante e metacaulim em substituição ao cimento

CAA (C-CV-M)*	Consumo de aditivo (kg/m <sup>3</sup> )	Espalhamento (mm)	T <sub>500</sub> (s)	Funil V (s)
60-40-0	7,4	730	2,2	6,0
40-60-0	6,6	730	2,2	7,0
90-0-10	11,0	730	6,0	20,0
85-0-15	11,0	690	7,0	8,0
60-30-10	6,0	710	4,4	7,7
40-45-15	6,8	695	2,5	4,0

\* C= cimento; CV = cinza volante; M = metacaulim.

Fonte: adaptada de Güneçyisi, Gesoğlu e Özbay (2010).

O CAA com 40% de cimento, 45% de cinza volante e 15% de metacaulim (40-45-15) apresentou viscosidade, avaliada pelo ensaio de espalhamento T<sub>500</sub>, semelhante ao CAA com somente 60% de cinza (40-60-0). No entanto, valor significativamente inferior foi verificado em relação àquele com 15% de metacaulim (85-0-15). Em fluxo confinado, o valor da viscosidade aparente desta mistura ternária também foi inferior em relação aos CAAs 40-60-0 e 85-0-15. Para o CAA 60-30-10, a viscosidade parece ter sido mais influenciada pelo metacaulim, levando-se em conta os valores de tempos de espalhamento T<sub>500</sub> ou tempos de escoamento pelo funil V. Além disso, para manter a fluidez com espalhamento na faixa de  $(700 \pm 30)$  mm, os CAAs produzidos com misturas ternárias de ligante demandaram consumos de aditivo superplastificante semelhantes ou menores que aqueles com os mesmos percentuais de substituição apenas por cinza volante. Porém, apresentaram consumos significativamente inferiores em relação aos CAAs com 10% e 15% de metacaulim em substituição ao cimento.

Deste modo, conforme abordado por Güneçyisi e Gesoğlu (2008), pode-se admitir que a utilização de cinza volante e metacaulim em composições ternárias melhora as propriedades no estado fresco das misturas, comparando-se com aquelas que contém misturas binárias de cimento e cinza volante ou cimento e metacaulim.

#### 2.4.1.2 Desempenho com aditivos químicos redutores de água

Ng e Justnes (2016) avaliaram a fluidez de pastas com diferentes tipos de aditivos plastificantes (lignosulfonato, condensado

formaldeído sulfonato de naftaleno e outros três a base de éter policarboxilatos) e teores de cinza volante (20%, 40% e 60%) em substituição ao cimento comum. Os autores verificaram que a fluidez é melhorada com a utilização destes produtos químicos, independentemente da quantidade de cinza volante. Melhor eficácia foi observada com o uso de policarboxilatos, sulfonato de naftaleno e por último lignosulfonatos. Quanto à tendência de manter a fluidez em função do tempo, destacaram-se os policarboxilatos, e posteriormente com desempenhos semelhantes o sulfonato de naftaleno e lignosulfonato.

Ainda, de acordo com Ng e Justnes (2016), os aditivos avaliados demonstraram interação dominante com as partículas de cimento, com pequena interação com a cinza volante. Desta forma, quando a cinza volante está presente no sistema cimentício, maior quantidade de aditivo estará disponível para adsorver sobre as superfícies das partículas de cimento, com consequente dispersão e melhorias nos fluxos da pasta.

#### **2.4.2 Hidratação do sistema cimento Portland - cinza volante**

Segundo Faria (2012), os componentes químicos do cimento Portland são basicamente os óxidos de cálcio ( $\text{CaO}$ ), sílica ( $\text{SiO}_2$ ), alumina ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) e óxido de ferro ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ), além do sulfato ( $\text{SO}_3$ ), abreviados em química do cimento como C, S, A, F e  $\bar{S}$ , respectivamente. Estão presentes também pequenas porcentagens de óxido de magnésio ( $\text{MgO}$ ) e dos álcalis sódio ( $\text{Na}_2\text{O}$ ) e potássio ( $\text{K}_2\text{O}$ ). Estes componentes apresentam-se na forma de quatro fases minerais que são o silicato tricálcico ( $\text{C}_3\text{S}$ ), silicato dicálcico ( $\text{C}_2\text{S}$ ), aluminato tricálcico ( $\text{C}_3\text{A}$ ), e ferroaluminato tetracálcico ( $\text{C}_4\text{AF}$ ), com adição de sulfato de cálcio ou gipsita ( $\text{C}\bar{\text{S}}\text{H}_2$ ) em teores menores ou iguais a 5%.

De acordo com Cincotto (2011), quando o cimento é misturado com água, imediatamente inicia-se o processo de dissolução das fases do clínquer e do sulfato de cálcio até que ocorra a saturação da solução. A dissolução é influenciada pela solubilidade dos constituintes do cimento e gera íons a partir dos quais irão formar-se os produtos hidratados. Assim, com a saturação da solução ocorre precipitação de espécies químicas hidratadas menos solúveis, até o enrijecimento da mistura, caracterizando o fenômeno inicial de hidratação por dissolução-precipitação.

Nesta primeira etapa, parte da água é consumida pelas reações de hidratação, além da evaporação do excesso que gera vazios e poros capilares. Os precipitados ocorrem em torno das partículas anidras, reduzindo a taxa de dissolução e conseqüente formação de produtos. Ocorre também a redução da dissolução dos anidros devido a redução da quantidade de água (CINCOTTO, 2011).

Em uma segunda etapa, quando a mobilidade iônica da solução se torna limitada, a hidratação das partículas residuais do cimento ocorre pelo processo topoquímico, ou seja, as reações ocorrem diretamente na superfície do cimento anidro, sem que seus compostos entrem em solução (MEHTA E MONTEIRO, 2014), ou em outras palavras, a água dos poros se difunde através dos produtos hidratados formados. Assim, a hidratação da parte anidra das partículas ocorre de fora para dentro (CINCOTTO, 2011).

Segundo Neville e Brooks (2013), os dois silicatos ( $C_3S$  e  $C_2S$ ), ao se hidratarem, formam compostos semelhantes, o silicato de cálcio hidratado (C-S-H) e o  $Ca(OH)_2$ . Ambos requerem aproximadamente a mesma quantidade de água para hidratação, porém o  $C_3S$  hidrata-se muito mais rápido e produz mais que o dobro de  $Ca(OH)_2$ , comparado ao  $C_2S$ . A reação do  $C_3A$  com a água é instantânea. Assim, o sulfato de cálcio atua na desaceleração desta reação. No entanto, mesmo assim, o aluminato hidrata-se mais rapidamente que os silicatos de cálcio. Mehta e Monteiro (2014), citam que, a reação de hidratação dos aluminatos se aplica tanto ao  $C_3A$ , quanto ao  $C_4AF$ , pois quando este último reage com água na presença de sulfato, os hidratos são estruturalmente semelhantes aos formados pelo  $C_3A$ .

Em função da gipsita e álcalis entrarem em solução rapidamente, a solubilidade do  $C_3A$  é reduzida. Dependendo da concentração de aluminatos e íons de sulfato na solução, precipitam trissulfoaluminato de cálcio hidratado (etringita) ou o monossulfoaluminato de cálcio hidratado (AFm). A etringita (AFt) normalmente hidrata-se primeiro devido à alta relação sulfato/aluminato na primeira hora de hidratação. Depois do sulfato ter sido consumido, ocorre nova hidratação do  $C_3A$  e  $C_4AF$ , aumentando a concentração de íons aluminato. A etringita se torna instável sendo gradualmente convertida em monossulfato, que é o produto final de hidratação do  $C_3A$  e  $C_4AF$  (MEHTA E MONTEIRO, 2014).

No sistema cimentício com elevado teor de cinza volante, fatores físicos e químicos combinam-se em todas as idades para densificar e promover a ligação da pasta (BERRY; HEMMING; S;

CORNELIUS, 1990). A cinza volante atua inicialmente apenas como material inerte através do efeito filer e de nucleação e, após o início da solubilização da sua fase vítrea, atua também quimicamente.

O efeito filer dispersa as partículas de cimento, possibilitando maior interação entre as fases anidras do cimento com a água. Além disso, a cinza volante atua na dissolução do cimento por adsorver íons de cálcio na superfície das partículas, com aumento na dissolução dos anidros do cimento e redução na precipitação dos hidratos. Na sequência, o efeito de nucleação aumenta o grau de hidratação do sistema, ao proporcionar pontos adicionais, além da superfície do cimento, para precipitação dos produtos de hidratação (HOPPE FILHO, 2008).

O efeito químico da cinza volante na hidratação do cimento resulta da interação da fase vítrea de suas partículas com o hidróxido de cálcio, derivando na precipitação de compostos hidratados semelhantes aos do cimento, porém, não produz o hidróxido de cálcio. Em vez disso, o consome pela reação pozolânica (HOPPE FILHO, 2008). Esta reação entre cinza volante e cimento pode ser descrita em duas etapas, onde inicialmente há solubilização dos componentes vítreos da cinza pela solução de poros altamente alcalina, seguida pela reação entre o silicato solubilizado e íons de cálcio em solução formando o C-S-H (BERRY; HEMMING; CORNELIUS, 1990).

Por apresentar composição química variável, diversos compostos vítreos da cinza volante acabam reagindo, formando hidratos distintos, mas de forma análoga (FU *et al.*, 2002; MASSAZZA, 1998<sup>9</sup>; MINDESS; YOUNG, 1981<sup>10</sup> *apud* HOPPE FILHO, 2008), sendo estes:

- Silicato de cálcio hidratado:
- $\text{SiO}_2 + \text{Ca(OH)}_2 + \text{H}_2\text{O} = \text{C-S-H}$
- Silicato de cálcio, aluminato de cálcio e sílico-aluminato de cálcio hidratado:
- $\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Ca(OH)}_2 + \text{H}_2\text{O} = \text{C-S-H, C-A-H, C-A-S-H}$
- Silicato de cálcio, aluminato de cálcio e sílico-ferro-aluminato de cálcio hidratado:

---

<sup>9</sup> MASSAZZA, F. Pozzolana and pozzolanic cements. In: Lea's chemistry of cement and concrete. Edited by Peter C. Hewlett. Fourth Edition. 1998.

<sup>10</sup> MINDESS, S.; YOUNG, J. F. Concrete. United States, Prentice-Hall, 1981.

- Sílica, alumina e ferro +  $\text{Ca(OH)}_2 + \text{H}_2\text{O} = \text{C-S-H}, \text{C-A-H}, \text{C-A[Fe]-S-H}$

Em resumo, de acordo com Fu *et al.* (2002), as partículas de cinza volante se dissolvem constantemente liberando sílica e alumina que, na presença de  $\text{Ca(OH)}_2$  e gesso, reagem com o cálcio e sulfato para formar produtos hidratados, como o silicato de cálcio hidratado e etringita. Em idades mais avançadas, estes continuam sendo os principais produtos de hidratação para este sistema, resultando em baixo teor de  $\text{Ca(OH)}_2$ . Em sistemas cimentícios com teores elevados de cinza volante, a reação pozolânica é relativamente pequena em idades iniciais, mas com acréscimos na taxa de hidratação com o avanço da idade, principalmente após 7 dias.

As afirmações de FU *et al.* (2002) refletem o comportamento relatado por Chindaprasirt, Jaturapitakkul e Sinsiri (2007) referente à morfologia da microestrutura de pastas com 20% e 40% de cinza volante substituindo o cimento, avaliadas através de microscópio eletrônico de varredura.

Muitos vazios e poucos produtos de hidratação foram observados em torno das partículas de cinza volante em 7 dias, porém aos 28 dias, diferentes configurações nas partículas de cinza volante foram verificadas. Algumas com sinais de ataque químico na superfície indicando a ocorrência da reação pozolânica, partículas lisas inertes que possivelmente até aquele momento serviram apenas como pontos de nucleação, e partículas com produtos de hidratação do cimento e pozolânicos em torno de suas superfícies. Aos 90 dias, a presença de partículas com superfícies fraturadas e bordas hidratadas tornou-se mais acentuada, com grande quantidade de partículas de cinza volante substituídas por C-S-H (CHINDAPRASIRT; JATURAPITAKKUL; SINSIRI, 2007).

Deve-se levar em consideração que relações a/mc muito baixas interferem na quantidade de reações de hidratação, tanto do cimento quanto pozolânicas, nestes sistemas com elevados teores de cinza volante. Poon, Lam e Wong (2000) constataram que o grau de reação da cinza volante em pastas foi aumentado, até a idade de 90 dias, à medida que a relação a/mc passou de 0,19 para 0,24. O mesmo ocorreu com o cimento. Hanehara *et al.* (2001) também abordam a maior taxa de reação da cinza volante em pastas cimentícias para relação água/ligante de 0,30 e 0,50.

No entanto, em estudo complementar, Lam, Wong e Poon (2000) verificaram que, quando a relação água/ligante passou para 0,50, o grau de reação da cinza volante foi reduzido, principalmente para teores elevados de cinza volante. Nesta última situação, a causa pode ser a diluição da concentração dos íons de cálcio na solução de poros, assim como, a redução do contato entre as partículas do sistema, devido à maior relação água/ligante. Foi verificado também que a cinza volante desenvolveu menor grau de reação pozolânica, quanto maior o percentual de substituição de cimento, fato que novamente pode ser relacionado com a menor concentração de íons de cálcio presente na solução de poros.

Wang e Park (2015) também constataram em misturas cimentícias (através de modelos matemáticos não abordados neste trabalho) que até a idade de 365 dias, mantendo o teor de cinza volante em 30% substituindo o cimento, que, com o aumento da relação água/ligante o grau de reação da cinza volante também aumenta. Os autores justificam os resultados devido à disponibilidade de mais espaços para formação de produtos de hidratação. As verificações foram realizadas em misturas com relações água/ligante de 0,19, 0,3 e 0,5. Além disso, para uma mesma relação água/ligante de 0,4, e teores de cinza volante em 20%, 40% e 60%, quanto maior a quantidade de cinza volante, menor o grau de reação desta pozolana.

No entanto, Herrera *et al.* (2011) verificaram que, nas primeiras 24 h, pastas com elevados teores de cinza volante e a pasta de referência hidrataram de forma semelhante. Deste modo, apesar de atrasos observados em ensaios de tempos de pega, a cinza volante não retarda a hidratação do cimento. O que ocorre é que simplesmente há menos cimento para promover a estrutura sólida e causar a pega quando esta pozolana é utilizada em grande quantidade.

Além disso, as reações de hidratação do cimento com a água são controladas tanto pela quantidade de água disponível, quanto pelo espaço disponível para formação dos hidratos. Em misturas de cimento e cinza volante, a água e o espaço para a hidratação do cimento são a água total da mistura e a porosidade total da pasta. Uma vez que existe mais espaço disponível, níveis mais elevados de  $\text{Ca(OH)}_2$  e de outros hidratos por unidade de peso de cimento são esperados, além da contribuição da cinza volante como pontos de nucleação (FELDMAN; CARETTE; MALHOTRA, 1990).

Também deve-se levar em consideração que o crescimento gradual dos hidratos precipitados no cimento e cinza volante pelo

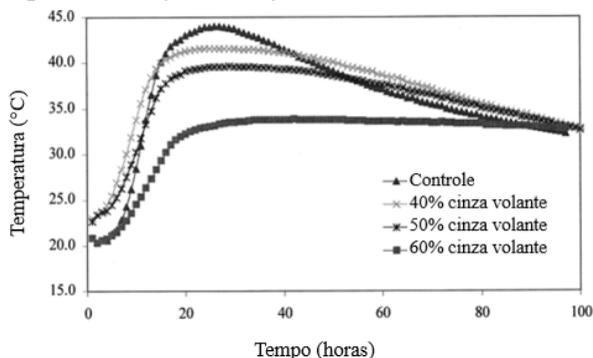
processo de dissolução/precipitação gera uma camada mais fina sobre a fração anidra remanescente das partículas, comparando ao sistema formado apenas com cimento. Esta camada menos espessa facilita a continuação de hidratação do cimento pelo processo topoquímico (difusão da água), resultando em maior grau de hidratação destas partículas ao longo do tempo (WANG; ZHANG; SUN, 2004<sup>11</sup> *apud* HOPPE FILHO, 2008).

#### 2.4.2.1 Calor de hidratação

Dal Molin (2011) afirma que, geralmente, a substituição do cimento por adições minerais promove menor liberação de calor durante as reações químicas de hidratação, devido à redução na quantidade de clínquer.

Bouzoubaâ e Lachemi (2001) acompanharam a elevação da temperatura de um concreto convencional com 336 kg/m<sup>3</sup> de cimento e relação a/c 0,50, assim como, de CAAs com teores de 40%, 50% e 60% de cinza volante em massa substituindo o cimento. Todos os CAAs tiveram o consumo de materiais cimentícios de 400 kg/m<sup>3</sup> e relação a/mc de 0,45. As medições das temperaturas ocorreram de forma semiadiabática e foram realizadas durante quatro dias. A evolução do calor pode ser observada na Figura 2.

Figura 2: Elevação de temperatura de concretos com cinza volante



Fonte: adaptada de Bouzoubaâ e Lachemi (2001).

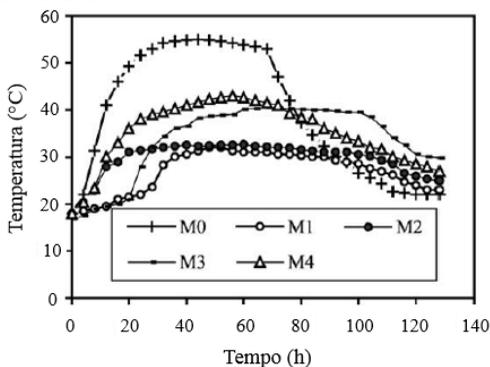
<sup>11</sup> WANG, A.; ZHANG, C.; SUN, W. Fly ash effects: II. The active effect of fly ash. *Cement and Concrete Research*, Vol. 34, Issue 11, p. 2057-2060, November 2004.

Bouzoubaâ e Lachemi (2001) constataram que, quanto maior o percentual de cinza volante, menor a elevação da temperatura no concreto. Valores aproximados de temperatura de pico de 44°C, 42°C, 40°C e 34°C foram verificados para os concretos com 0%, 40%, 50% e 60% de cinza volante, respectivamente.

Concretos com teores de 50% e 70% de cinza volante classe F, em massa, substituindo o cimento comum, foram testados por Atis (2002) quanto ao desenvolvimento da temperatura de hidratação em sistema semiadiabático. Para cada teor de cinza volante, uma amostra foi verificada estando com consistência de concreto compactado com rolo (CCR) e a sua semelhante, com espalhamento próximo a 600 mm, conseguido com aditivo superplastificante. Nesta avaliação, foi produzido um concreto de referência (0% de cinza volante) com relação a/c 0,55 e consumo de cimento de 400 kg/m<sup>3</sup>, denominado M0. Este concreto também foi realizado com espalhamento em torno de 600 mm.

Para o teor de 70% de cinza volante, os concretos produzidos por Atis (2002) foram denominados como M1 (com superplastificante) e M2 (CCR), ambos com relação a/mc em torno de 0,29. Os concretos com teor de 50% de cinza foram denominados como M3 (com superplastificante) e M4 (CCR), com relação a/mc de 0,33 e 0,30, respectivamente. O comportamento quanto a elevação da temperatura dos concretos pode ser visualizado na Figura 3.

Figura 3: Aumento de temperatura de concretos com cinza volante e concreto de referência



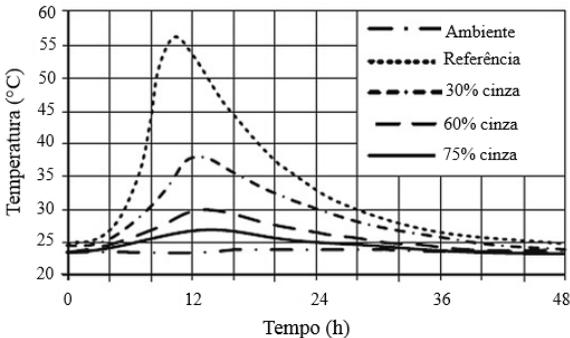
Fonte: adaptada de Atis (2002).

O concreto M0 atingiu o maior pico de temperatura, próximo a 55°C, M1 e M2 apresentaram os menores picos, em aproximadamente 30°C. M3 e M4 exibiram valores de elevação de temperatura em torno

de 42°C, no entanto ficando acima das misturas com 70% de substituição do cimento. Ou seja, quanto maior o nível de substituição do cimento por cinza volante, menor o aumento de temperatura, devido à diluição do cimento e a hidratação mais lenta da cinza volante com o  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  do cimento hidratado (ATIS, 2002).

Verificações quanto a temperatura máxima de hidratação em pastas com substituições de cimento por cinza volante, através da utilização de calorímetro semiadiabático, também foram realizadas por Herrera *et al.* (2011), durante um período de 48 h, sendo os resultados apresentados na Figura 4.

Figura 4: Curvas de liberação de calor de pastas com cinza volante em função do tempo



Fonte: adaptada de Herrera *et al.* (2011).

As misturas foram confeccionadas com teores de 0%, 30%, 60% e 75% em massa de cinza volante, e relações a/mc de 0,50, 0,60, 0,60 e 0,55 respectivamente. Os resultados comprovaram que a utilização de cinza volante em grandes percentuais reduz a temperatura de pico significativamente (HERRERA *et al.*, 2011).

Redução dos efeitos térmicos para misturas com baixas relações a/mc e elevados volumes de cinza volante, também foram observadas por De La Varga *et al.* (2012). Testes realizados em equipamento semelhante ao calorímetro semiadiabático, com argamassas de relação a/mc de 0,30, mostraram que, com substituição de 40% e 60% de cimento por cinza volante, em volume, a temperatura de pico foi inferior em aproximadamente 20% e 35%, respectivamente, comparadas com a argamassa de referência (DE LA VARGA *et al.*, 2012).

Yoshitake *et al.* (2013) verificaram redução média de 40% nos valores acumulados de temperatura adiabática em concretos com 50%

de cinza volante (em massa), comparando com a mistura de referência moldada apenas com cimento, no período de 7 dias. Os concretos foram produzidos com relação a/mc de 0,49 e consumo de ligante (cinza volante e cimento) de 338 kg/m<sup>3</sup> constantes. A pozolana utilizada apresentava propriedades semelhantes à da cinza volante classe F, conforme ASTM.

Junckes (2015) avaliou a elevação adiabática de temperatura de concretos durante as primeiras 72 h após a mistura. Os concretos foram confeccionados para resistência característica à compressão, em 28 dias, de 35, 45 e 55 MPa, para temperatura de cura em 23°C. Em todos os casos, substituições de cimento por cinza volante foram realizadas em teores de 0%, 15%, 30% e 45% (em volume). Os resultados demonstraram que as taxas de geração de calor nas misturas com cimento e cinza volante foram semelhantes às das misturas de referência (0% de cinza), para diferentes consumos de ligante por m<sup>3</sup> de concreto e diferentes teores de cinza volante.

Como mencionando anteriormente, em misturas com elevados teores de cinza volante, a pozolana pode proporcionar espaços adicionais entre as partículas de cimento, agindo também como pontos de nucleação, o que pode aumentar a taxa de hidratação do cimento.

Este efeito foi mencionado por Poon, Lam e Wong (2000), após acompanharem a liberação de calor de pastas com relação a/mc 0,24, e substituição do cimento, em massa, pela mesma quantidade de cinza volante classe F. Os autores verificaram que a redução na liberação de calor foi menor do que a redução do teor de cimento. A substituição de cimento por cinza volante em 25% e 45%, resultou na redução do calor acumulado em apenas 16% e 36%, respectivamente, em comparação a pasta de referência (0% de cinza volante).

Outro efeito a ser considerado, segundo Hanehara *et al.* (2001), é que a reação pozolânica da cinza volante na mistura cimentícia depende altamente da temperatura de cura, sendo que, quanto mais elevada, maior será o grau de reação da cinza volante, além de ocorrer em menor período de tempo. Pastas de cimento e cinza volante em teores de 20%, 40% e 60%, curadas a 20°C apresentaram início da reação pozolânica em torno de 28 dias, no entanto, quando curadas a 40°C, a reação começou em aproximadamente 7 dias.

Narmluk e Nawa (2011) verificaram em pastas com relação água/ligante de 0,25 e substituição volumétrica de cimento por cinza volante em teores de 25% e 50%, quando submetidas às temperaturas de cura de 20°C, 35°C e 50°C, que a reação pozolânica teve início em 336 h, 72 h e 12 h, respectivamente, após o momento da mistura.

Deschner *et al.* (2013) estudaram o efeito da temperatura sobre a cinética de hidratação em pastas com 50% de cinza volante substituindo o cimento e relação água/ligante de 0,50. O início da reação pozolânica, indicado pelo consumo de  $\text{Ca(OH)}_2$ , ocorreu após 90, 7 e 1 dias para as temperaturas de 7°C, 23°C e 40°C, respectivamente. Para a temperatura de 50°C, a reação pozolânica iniciou após 16 h, e antes de 16 h para temperatura de 80°C.

Narmluk e Nawa (2011) relataram também o aumento do período de dormência das pastas com cinza volante, comparado ao da pasta feita apenas com cimento, com efeito mais pronunciado quanto maior o teor de cinza volante. Este fato pode estar relacionado com a redução de íons de cálcio ( $\text{Ca}^{+2}$ ) na solução de poros, em função da adsorção dos mesmos na superfície das partículas de cinza volante. Esta diminuição de íons de cálcio na solução, que ocorre nos períodos iniciais, retarda o processo de hidratação, pois atrasa a formação de C-S-H e  $\text{Ca(OH)}_2$  (LANGAN; WENG; WARD, 2002<sup>12</sup> *apud* JUNCKES, 2015).

Os efeitos da liberação de calor devidos à incorporação de metacaulim em conjunto com cinza volante, em substituição do cimento, foram avaliados, em argamassas, por Bai e Wild (2002). Além disso, foi verificada também a influência da substituição do cimento por cinza volante (10%, 20%, 30% e 40%) ou metacaulim (5%, 10% e 15%). Dentre as misturas ternárias, destacam-se aquelas com maiores teores de cinza volante. As combinações ocorreram nas proporções de 70-27,5-2,5%, 70-25-5%, 70-22,5-7,5% e 60-30-10%, seguindo a ordem de cimento, cinza volante e metacaulim. Todas as argamassas foram confeccionadas com relação a/mc de 0,50, com substituições do cimento em massa e avaliadas durante 7 dias pelo método semiadiabático.

Bai e Wild (2002) verificaram, nas misturas binárias e ternárias, que o tempo para atingir a temperatura de pico foi maior em relação à argamassa de referência (100% de cimento). A utilização apenas de cinza volante em substituição ao cimento diminui a taxa inicial de liberação de calor e a temperatura de pico, quanto maior o teor de cinza volante. No entanto, comportamento oposto foi verificado com a utilização do metacaulim. Com a combinação de cinza volante e metacaulim, o efeito de cada adição na elevação da temperatura foi

---

<sup>12</sup> LANGAN, B. W.; WENG, K.; WARD, M. A. Effect of silica fume and fly ash on heat of hydration of Portland cement. *Cement and Concrete Research*, n. 32, p. 1045–1051, 2002.

minimizado. Ou seja, o aumento da velocidade inicial de liberação de calor fornecido pelo metacaulim foi compensado pela taxa reduzida proporcionada pela cinza volante. A vantagem da utilização de cinza volante em conjunto com o metacaulim, nos casos abordados, é que o aumento da temperatura das argamassas foi inferior à mistura executada apenas com cimento.

Seguindo a mesma configuração supracitada Snelson, Wild e O'Farrell (2008) também verificaram a liberação de calor de pastas, em misturas binárias e ternárias. Os teores de substituição do cimento (em massa) variaram de 0% a 40% de cinza volante, 0% a 20% de metacaulim e combinações de 15-5%, 10-10% e 5-15% para cinza volante e metacaulim, respectivamente. Todas as medições foram realizadas em pastas com relação a/mc de 0,5.

Snelson, Wild e O'Farrell (2008) abordaram o fato de que a liberação de calor do cimento em misturas binárias de cimento e cinza volante é aumentada no primeiro pico de evolução de calor devido a maior disponibilidade de água para sua hidratação. No entanto, em períodos maiores (até 120 h) o aumento nos níveis de cinza volante causa reduções sistemáticas na produção de calor em função da baixa atividade pozolânica deste componente. Conseqüentemente, o valor de calor acumulado nestes casos também reduz. Os autores indicaram ainda que, em misturas binárias de cimento e metacaulim, o metacaulim inicialmente diminuiu a hidratação do cimento, possivelmente devido à alta demanda de água. Subseqüentemente, o metacaulim contribuiu fortemente na produção de calor devido a rápida reação pozolânica aumentando também o calor total acumulado das misturas.

Nas misturas ternárias avaliadas, o metacaulim teve influência dominante no desenvolvimento de calor. Mesmo assim, aquelas misturas com combinações de 15-5% e 10-10% de cinza volante e metacaulim, respectivamente, em substituição ao cimento apresentaram calor de hidratação acumulado inferior ao da mistura de referência executada apenas com cimento (SNELSON; WILD; O'FARRELL, 2008). Entretanto, deve-se considerar que, nestes casos, os teores de cinza volante em substituição ao cimento foram relativamente baixos.

### **2.4.3 Influência no estado endurecido**

A seguir, estão apresentadas considerações de pesquisas relacionadas ao desempenho de concretos com elevados teores de cinza volante, quanto à resistência à compressão, módulo de elasticidade e influência da cura. Ênfase é dada ao CAA, porém, resultados

considerados relevantes de misturas cimentícias em geral, também são abordados.

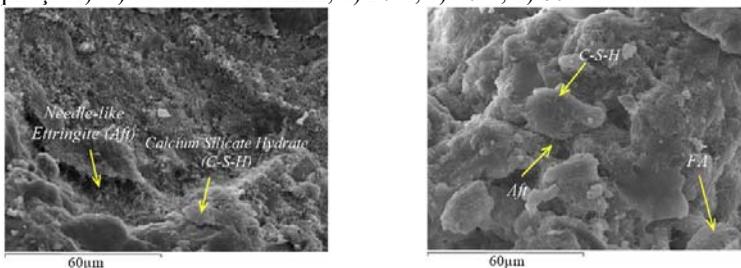
#### 2.4.3.1 Resistência à compressão

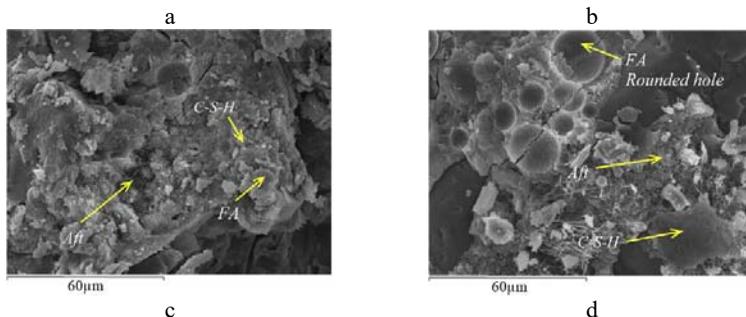
O comportamento quanto à resistência à compressão de CAAs com elevados teores de cinza volante substituindo o cimento merece atenção especial, principalmente em curtos períodos de tempo, onde normalmente a reação pozolânica não ocorre efetivamente.

Nehdi, Pardhan e Koshowski (2004) verificaram que o CAA com substituição de cimento por 50% de cinza volante, em massa, apresentou redução no valor de resistência à compressão, comparado a um CAA sem substituição de cimento. A relação  $a/mc$  de 0,38 e o consumo de ligante em  $430 \text{ kg/m}^3$  foram constantes nos dois casos. Os valores obtidos para o CAA de referência e para o CAA com cinza volante foram de 35,5 e 20,4 MPa, aos 28 dias e, 40,7 e 28,1 MPa aos 91 dias, respectivamente. Os ensaios foram realizados em corpos de prova cilíndricos. Entretanto, neste caso, um aditivo incorporador de ar foi adicionado na composição dos CAAs ocasionando um teor de ar incorporado de 8% para o CAA feito apenas com cimento e de 6,7% para o CAA com cinza volante. Este fato pode ter colaborado para os valores relativamente baixos de resistência à compressão verificados, principalmente para o CAA sem cinza volante.

Reduções nesta propriedade mecânica, aos 28 dias, também foram verificadas por Sua-iam e Makul (2014). CAAs com 20%, 40% e 60% de cinza volante em substituição ao cimento (em volume) apresentaram resultados inferiores aos do concreto de referência em 5,7%, 20,3% e 39,8%, respectivamente, avaliados em amostras cilíndricas. A Figura 5 exibe micrografias da estrutura interna dos CAAs.

Figura 5: Micrografia das estruturas internas dos CAAs aos 28 dias (1000 ampliações): a) concreto referência; b) 20%; c) 40%; d) 60% de cinza volante





C-S-H (silicato de cálcio hidratado); FA (cinza volante); Aft (etringita).  
 Fonte: adaptada de Sua-iam e Makul (2014).

De acordo com Sua-iam e Makul (2014), as imagens mostram os principais produtos de hidratação do cimento e reação pozolânica, sendo estes o silicato de cálcio hidratado e etringita. A mistura de referência apresentou-se bastante densa. Entretanto, as amostras dos CAAs com cinza volante apresentaram maior quantidade de etringita e microfissuras cruzando através das partículas de cinza volante que não reagiram. Isto indica que a zona de transição entre a pasta de cimento e desta pozolana é mais fraca que a pasta de cimento puro, influenciando diretamente na resistência à compressão.

Efeito oposto foi relatado anteriormente por Feldman, Carette e Malhotra (1990), ao afirmarem que há boa ligação entre partículas de cinzas volantes que não reagem e a matriz de cimento. Wang, Zhang e Sun (2004<sup>13</sup> *apud* HOPPE FILHO, 2008), entretanto, citam que, quando ocorre o efeito químico da reação pozolânica na interface da matriz com as partículas de cinza volante, há um aumento da resistência mecânica nesta zona de transição.

Khatib (2008) produziu CAAs com substituição de cimento por cinza volante, em massa, em teores de 0%, 20%, 40%, 60% e 80% mantendo a relação a/mc constante em 0,36. O autor verificou que os CAAs com cinza volante apresentaram resultados de resistência à compressão menores comparados ao do concreto de referência, em todas as idades avaliadas de 1, 7, 28 e 56 dias. No entanto, aos 56 dias, o CAA com 40% de pozolana apresentou resultados superiores ao CAA de 20% de cinza volante, chegando próximo de 70 MPa. Nesta mesma idade, o

<sup>13</sup> WANG, A.; ZHANG, C.; SUN, W. Fly ash effects: III. The microaggregate effect of fly ash. *Cement and Concrete Research*, Vol. 34, Issue 11, p. 2061-2066, November 2004.

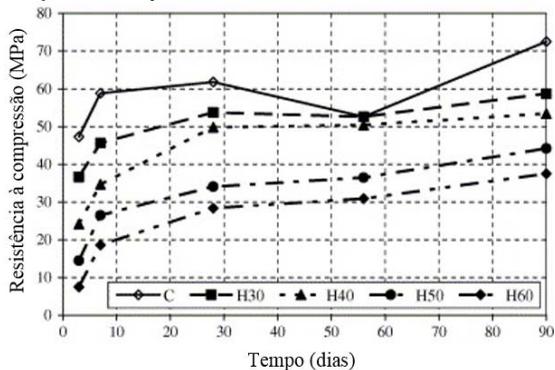
concreto com 60% de pozolana atingiu 40 MPa. Os ensaios foram realizados em amostras cúbicas de 100 mm de aresta curadas submersas em água à 20°C.

Os CAAs produzidos por Güneyisi *et al.* (2015), com substituição do cimento por cinza volante em teores de 25%, 50% e 75% em massa, também resultaram em menores resistências à compressão comparando ao traço padrão (0% de cinza), em aproximadamente 12%, 24% e 54,5%, respectivamente. Estes valores foram obtidos aos 28 dias em corpos de prova cúbicos de 150 mm de lado. Todas as misturas foram desenvolvidas com consumo de ligante de 570 kg/m<sup>3</sup> e relação a/mc constante em 0,33.

Fica evidente que concretos com altos teores de cinza volante reduzem a resistência à compressão, quando se compara aos que utilizam apenas cimento, principalmente em idades consideradas comuns para avaliação desta propriedade mecânica, como 28 dias. No entanto, é em idades maiores que se observa os benefícios da utilização deste tipo de mistura cimentícia, com menores prejuízos nos valores de resistência à compressão.

Na Figura 6, percebe-se com clareza o aumento constante da resistência à compressão em relação ao tempo, assim como a redução desta propriedade mecânica em função do aumento no percentual de cinza volante, para CAAs. As avaliações foram realizadas em amostras cilíndricas de 100 mm de diâmetro e 200 mm de altura, com substituições do cimento em massa (YAZICI, 2008).

Figura 6: Relação entre resistência à compressão e teor de cinza volante, em função do tempo



C=100% de cimento; H30, H40, H50 e H60 representam o teor de cinza volante em substituição ao cimento.

Fonte: adaptada de Yazici (2008).

Liu (2010) verificou comportamentos semelhantes. CAAs com até 40% de cinza volante apresentaram aumento mais relevante nos valores de resistência à compressão dos 7 aos 28 dias, indicando que a hidratação do cimento acontece em grande parte até esta idade. Porém para os concretos com 60% e 80% de cinza volante, o acréscimo na resistência foi mais expressivo para idades maiores. As amostras de referência e com 40% de cinza volante apresentaram aos 28 dias resistência à compressão de 73,3 e 58,5 MPa, aos 90 dias de 79,0 e 63,0 MPa e, aos 180 dias de 84,1 e 68,0 MPa, respectivamente. Com 60% de cinza volante, os valores foram de 37,2, 49,3 e 56,4 MPa, nas mesmas idades. O autor afirma ainda que a diferença da resistência à compressão entre os CAAs com e sem cinza volante reduziu com aumento da idade. As verificações foram realizadas em corpos de prova cúbicos de 100 mm de lado.

Nos resultados apresentados por Yazici (2008) e Liu (2010), é possível verificar que a resistência à compressão é mais prejudicada para teores acima de 40% de cinza volante, em substituição ao cimento. Esta tendência ocorreu nos dois estudos, mesmo com avaliações em corpos de prova com geometrias diferentes, e a substituição do cimento sendo feita em massa e volume, respectivamente. Segundo Liu (2010), isso ocorre em função da reação pozolânica com o  $\text{Ca(OH)}_2$  do cimento hidratado ser lenta, e assim, quanto maior a quantidade de substituição do cimento, maior a redução das propriedades do concreto endurecido, visto que, não há produtos de hidratação do cimento suficientes para reagir com a cinza volante.

Hoppe Filho (2008) aborda o fato de que a pasta de cimento necessita de maior teor de produtos de hidratação quando comparada à pasta pozolânica, para atingir um mesmo nível de resistência à compressão. No entanto, a pasta pozolânica necessita de tempos maiores para atingir tal resistência. Ou seja, uma mesma resistência à compressão conseguida com materiais cimentícios diferentes não está vinculada com a quantidade de hidratos. Além disso, a cinza volante, ao proporcionar o efeito filler e através da atividade pozolânica, influencia diretamente na resistência à compressão final.

Ganhos de resistência à compressão com o aumento da idade, também foram comprovados por Dinakar, Babu e Santhanam (2008), os quais avaliaram CAAs com substituição do cimento, em massa, pela

cinza volante classe F, comparando os resultados com os de concretos vibrados convencionais dosados para classes de resistências equivalentes (sem utilização de cinza volante). O consumo de materiais cimentícios para os CAAs foi de 550 kg/m<sup>3</sup>, e para os concretos convencionais foi variável. Os parâmetros desejados no estado fresco foram obtidos com aditivo superplastificante e relação a/mc variável para cada mistura. As amostras foram moldadas em cubos de 100 mm de lado.

O CAA confeccionado com 85% de cinza volante apresentou resistência inferior à do concreto vibrado de referência em todas as idades, porém aos 90 dias atingiu a resistência de projeto (20 MPa). Com 70% de cinza volante no CAA, o ganho de resistência foi semelhante ao do concreto vibrado, ambos atingindo aos 28 dias a resistência de projeto (30 MPa). No entanto, a 180 dias, a resistência obtida pelo CAA foi maior do que a do concreto convencional, sendo 57,3 e 45 MPa, respectivamente. Com teor de 50% de cinza volante, o CAA apresentou resistências inferiores às do concreto vibrado de mesma classe de resistência (60MPa) mas, aos 180 dias, as resistências praticamente se igualaram (DINAKAR; BABU; SANTHANAM, 2008).

Da mesma forma que as pesquisas abordadas até o momento, bons resultados em CAAs com elevados teores de cinza volante em misturas binárias (cimento e cinza volante) e ternárias (cimento, cinza volante e filer calcário), com substituições do cimento em massa, foram encontrados por Celik *et al.* (2015). Os valores de resistência à compressão podem ser visualizados na Tabela 8. A relação a/mc foi constante em 0,35. Os ensaios de resistência à compressão foram realizados em amostras cilíndricas.

Tabela 8: Valores de resistência à compressão para CAAs com cinza volante e filer calcário

Mistura (C-CV-F)*	Idade (dias)		
	28	91	365
100-0-0	53,9	66,3	77,1
85-0-15	43,2	49,7	53,0
75-0-25	33,6	38,7	42,2
70-30-0	51,0	64,6	71,8
50-50-0	41,6	54,8	64,8
55-30-15	37,5	47,3	56,8
45-40-15	33,9	46,2	56,5
35-50-15	26,0	39,3	49,0
25-60-15	20,6	29,4	39,5
55-20-25	36,3	42,9	54,2
45-30-25	31,5	43,3	55,3

35-40-25	28,9	41,8	50,4
25-50-25	20,6	32,8	38,0

\*C = cimento; CV = cinza volante; F = filer calcário.

Fonte: adaptada de Celik *et al.* (2015).

De forma geral, a utilização de cinza volante, ou cinza volante e filer calcário em substituição ao cimento, influenciou negativamente na resistência à compressão, comparando-se com as do concreto 100-0-0 (cimento, cinza volante e filer calcário). No entanto, se observados os concretos contendo cinza volante, na idade de 365 dias, percebe-se que as misturas 70-30-0 e 50-50-0 apresentaram bons resultados.

Ainda aos 365 dias, comparando os CAAs com 15% e 25% de filer calcário, diferenças pouco significativas foram observadas entre as misturas com o mesmo teor de cimento, como por exemplo, 45-40-15 e 45-30-25, que apresentaram, 56,5 e 55,3 MPa, respectivamente. A maior diferença, de 11 MPa, foi encontrada para os CAAs com 50% de cinza volante, ou seja, 35-50-15 e 25-50-25. Estas observações, levam a conclusão de que um produto menos oneroso ambientalmente pode ser produzido, com maiores substituições de cimento por cinza volante (CELIK *et al.*, 2015).

Avaliações em argamassas, com 58% de cinza volante em massa substituindo o cimento e relação a/mc 0,30, foram realizadas por Berry, Hemmings e Cornelius (1990), os quais indicaram excelente desenvolvimento da resistência a longo prazo. Observações quanto ao aumento na porosidade, até a idade 365 dias, também foram relatadas, fato este de difícil explicação, mas que pode ter sido ocasionado pela substituição de produtos sólidos por produtos de maior densidade ou pela retração de algum componente da pasta.

Hoppe Filho (2008) afirma que pastas de cimento e cinza volante sempre terão maior porosidade comparadas às pastas feitas somente com cimento, pois a menor porosidade em pastas pozolânicas depende exclusivamente da hidratação do cimento. Deste modo, a atividade pozolânica não tem influência na redução do volume total de poros. Contudo, contribui no refinamento da microestrutura em função dos hidratos secundários que se depositam sobre aqueles formados previamente pela hidratação do cimento. Em consequência, ocorre o aumento de mesoporos (10 nm a 50 nm) em idades avançadas, e redução dos poros maiores que 50 nm, influenciando também na interconectividade da rede capilar. Consequentemente, em função da maior porosidade da matriz, a resistência à compressão da mistura pozolânica é reduzida.

Neste tipo de sistema cimentício, pequenas diferenças na resistência à compressão são verificadas entre concretos de cimento e concretos de cimento e cinza volante, quando relações a/mc muito baixas são utilizadas, da ordem de 0,19 a 0,24. Isso ocorre devido às reduções das reações de hidratação do cimento e pozolânicas. Desta forma, parte do cimento e a maioria das partículas de cinza volante atuam apenas como material de enchimento (POON; LAM; WONG, 2000).

Quanto à utilização combinada de cinza volante e metacaulim em substituição ao cimento Güneyisi e Gesoğlu (2008) e Güneyisi, Gesoğlu e Özbay (2010) verificaram em argamassas e concretos autoadensáveis, respectivamente, que a resistência à compressão diminuiu em relação as misturas produzidas apenas com cimento. Entretanto, tais reduções foram menos expressivas comparadas com aquelas verificadas com a utilização de misturas binárias de cimento e cinza volante.

Com relação aos CAAs produzidos por Güneyisi, Gesoğlu e Özbay (2010), o CAA de referência apresentou em 28 dias de idade resistência à compressão de 80,9 MPa. Nesta mesma idade, os CAAs com 45% de cinza volante e 15% de metacaulim em substituição ao cimento e aquele com 60% de cinza volante atingiram valores de 67,5 e 47,5 MPa, respectivamente. Aos 91 dias os valores foram de 91,1, 81,3 e 64,8 MPa, seguindo a mesma ordem.

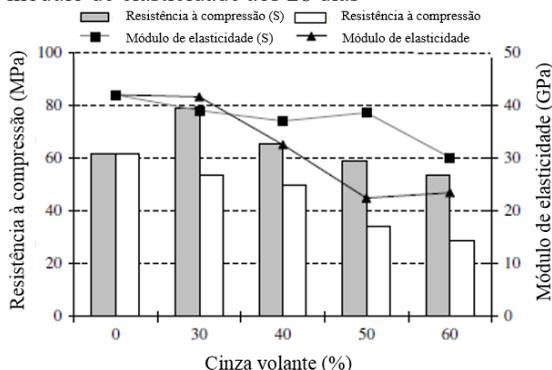
#### 2.4.3.2 Módulo de elasticidade

Em CAAs com elevados teores de cinza volante, além dos efeitos ocasionados pela substituição do cimento por um material menos reativo nas primeiras idades, deve-se considerar também que, quando a cinza volante substitui parcialmente o cimento, em massa, maior volume de finos e conseqüente maior volume de pasta podem ser esperados, visto a menor massa específica desta pozolana.

Neste contexto, Yazici (2008) verificou que o aumento do teor de cinza volante em substituição ao cimento reduziu significativamente o módulo de elasticidade do concreto, em mais de 30% para os teores de 50% e 60% de cinza volante, quando comparados aos do concreto de referência (0% de pozolana). Na Figura 7 pode-se visualizar a redução nos valores de módulo de elasticidade dos CAAs com cinza volante, assim como para CAAs com cinza volante e sílica ativa em substituição ao cimento. Nesta última situação os mesmos percentuais de cinza volante em substituição ao cimento foram mantidos (30%, 40%, 50% e

60%), porém, além destes, mais 10% do peso inicial do cimento também foi substituído por sílica ativa nos CAAs.

Figura 7: Influência do teor de cinza volante na resistência à compressão e módulo de elasticidade aos 28 dias



(S) = CAA com substituição do cimento por cinza volante e mais 10% de sílica ativa, em massa.

Fonte: adaptada de Yazici (2008).

Percebe-se que, para os CAAs com até 50% de cinza volante e mais 10% de sílica ativa (em massa), o módulo de elasticidade não foi tanto influenciado como nos CAAs sem a presença de sílica. Além disso, os valores de resistência à compressão dos CAAs com sílica ativa também foram menos afetados em relação à mistura de controle (100% de cimento) (YAZICI, 2008).

Liu (2010) também verificou que, quanto maior o percentual de substituição de cimento por cinza volante, maior é a redução do módulo de elasticidade dinâmico, sendo este mais afetado em idades menores. Aos 28 dias, para os CAAs com teores de cinza volante de 0%, 20%, 40%, 60% e 80% em volume, os valores encontrados foram de 48, 47, 44, 39 e 31 GPa, respectivamente. Com idade de 180 dias houve acréscimo de 4%, 6%, 7%, 10% e 19 % para a mesma sequência de níveis de cinza volante.

Fica evidente que, quanto maior o teor de cinza volante, maior é o ganho nos valores de módulo de elasticidade com o tempo, mesmo que se apresentem ainda inferiores, até a idade avaliada, em comparação ao concreto de referência. A determinação do módulo de elasticidade dinâmico realizada por Liu (2010), foi feita através de ensaio não destrutivo, mas vale ressaltar que de acordo com Mehta e Monteiro (2014), estes valores são maiores do que o módulo de elasticidade estático.

Menores valores de módulo de elasticidade estático também foram verificados por Siddique (2004), na produção de concretos convencionais vibrados com relação a/mc em torno de 0,40 e consumo de ligante de 400 kg/m<sup>3</sup>, com teores de cinza volante de 40%, 45% e 50% em massa, substituindo o cimento. Corpos de prova cilíndricos foram testados aos 28, 91 e 365 dias. O módulo foi determinado através da curva tensão-deformação, a partir da origem até a tensão referente a 33% da tensão máxima. Os valores encontrados estão expostos na Tabela 9.

Tabela 9: Valores de módulo de elasticidade avaliados até a idade de 365 dias, para concretos vibrados

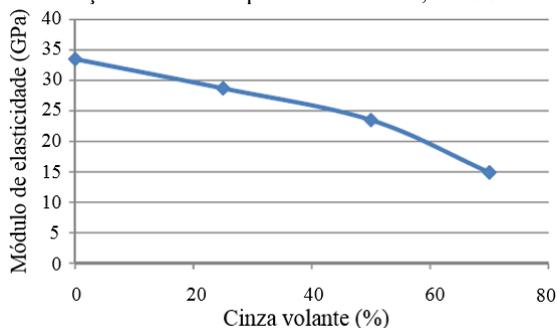
Mistura	Módulo de elasticidade (GPa)		
	28 dias	91 dias	365 dias
0%	29,9	31,0	31,0
40%	20,9	22,1	24,3
45%	19,8	20,9	22,2
50%	19,0	19,2	20,9

Fonte: adaptada de Siddique (2004).

Siddique (2004) ressalta a melhoria contínua observada a partir de 28 dias, com acréscimos verificados aos 91 e 365 dias. Entretanto, valores menores em 22%, 28% e 33% no módulo de elasticidade, para os concretos com 40%, 45% e 50% de cinza volante, respectivamente, foram observados quando comparados aos do concreto referência, aos 365 dias, ficando evidente maiores efeitos quanto maior o teor de cinza volante.

Kayali e Ahmed (2013) também verificaram reduções nos valores de módulo de elasticidade aos 365 dias de idade, de concretos com substituição do cimento comum, em massa, por cinza volante classe F, conforme apresentado na Figura 8. Todos os concretos foram confeccionados com 450 kg/m<sup>3</sup> de materiais cimentícios e relação a/mc de 0,38. A cura ocorreu em ambiente com temperatura de 23°C e umidade relativa do ar de 50%. Os testes foram realizados em amostras cilíndricas de 100 mm de diâmetro e 200 mm de altura.

Figura 8: Tendência do comportamento do módulo de elasticidade em função da substituição de cimento por cinza volante, aos 365 dias



Fonte: adaptada de Kayali e Ahmed (2013).

Com os teores de substituição do cimento em 25%, 50% e 70%, a redução foi de aproximadamente 15%, 30% e 56%, respectivamente, comparando-se ao concreto de referência (KAYALI; AHMED, 2013).

Em contrapartida, ainda nas primeiras pesquisas desenvolvidas em concretos vibrados com elevados teores de cinza volante, Sivasundaram, Carrette e Malhotra (1990) verificaram bom desempenho quanto ao módulo de elasticidade, atribuindo os resultados à densificação causada pelo efeito filer das partículas da cinza volante.

Neste sentido, Bouzoubaâ, Zhang e Malhotra (2001) compararam concretos com 55% de cinza volante em substituição ao cimento, com relação a/mc 0,32 e consumo de ligante em torno de 374 kg/m<sup>3</sup>. Como referência, um concreto sem pozolana com relação a/mc 0,40 e consumo de cimento de 385 kg/m<sup>3</sup> também foi executado. Testes em amostras cilíndricas, apontaram valores de módulo de elasticidade, aos 91 dias, de 30,6 e 31,6 GPa respectivamente, para o concreto com cinza volante e concreto de referência.

Valores de módulo de elasticidade semelhantes em concretos convencionais vibrados, com 50% do cimento em massa substituído por cinza volante e adição de filer calcário, também foram verificados por Yoshitake *et al.* (2014). Concretos com relação a/mc 0,38, 0,45 e 0,49 apresentaram aos 91 dias, 33,5, 34,0 e 32,2 GPa, respectivamente. Esta proximidade entre os valores pode ter sido decorrente da atuação da cinza volante e/ou do filer calcário. Neste caso, todos os concretos foram curados submersos em água a 20°C.

Huang *et al.* (2013) desenvolveram concretos com cinza volante Classe F, em substituição ao cimento, em teores de 20%, 40%, 60% e 80%, em massa. Duas cinzas volantes foram avaliadas, estas com

diferentes teores de perda ao fogo, de 4,6% e 7,8%. Os concretos foram concebidos a fim de atingir aos 28 dias resistência à compressão de 35 MPa. Todas as misturas foram dosadas com 340 kg/m<sup>3</sup> de materiais cimentícios (cimento e cinza volante), com exceção dos concretos com 80% de cinza, que foram confeccionados com 680 kg/m<sup>3</sup>.

Reduções nas relações a/mc foram realizadas para concretos com maiores percentuais de cinza volante, as quais variaram de 0,60 para o concreto de referência, e 0,24 para os concretos com 80% de cinza volante. Verificações no estado endurecido foram feitas em diferentes idades, em amostras cilíndricas de 100 mm de diâmetro por 200 mm de altura. Na Tabela 10 encontram-se os valores de módulo de elasticidade para as diferentes misturas.

Tabela 10: Módulo de elasticidade para concretos com diferentes teores e cinzas volantes

Mistura (% de cinza volante)	Cinza volante	Módulo de elasticidade (GPa)		
		28 dias	91 dias	365 dias
0		26,9	28,3	33,0
20	4,6% de perda ao fogo	26,4	30,2	38,6
40		26,8	32,6	40,8
60		26,2	32,8	41,4
80		18,7	23,9	29,8
0		26,9	28,3	33,0
20	7,8% de perda ao fogo	27,1	31,2	36,0
40		25,7	30,7	36,1
60		23,3	30,9	37,3
80		15,9	23,2	27,5

Fonte: adaptada de Huang *et al.* (2013).

Todos os concretos atingiram a resistência à compressão de projeto aos 28 dias, com exceção das misturas com 60% e 80% de pozolana, onde a equivalência foi alcançada em idades mais avançadas. Os concretos com cinza volante apresentaram aumento significativo nos valores de módulo de elasticidade entre as idades de 28 a 365 dias, diferente do que ocorreu com o concreto de controle. Valores de módulo de elasticidade superiores, em um ano, também foram obtidos nos concretos com cinza volante quando comparados ao concreto feito apenas com cimento, com exceção das misturas com 80% da pozolana que apresentaram os menores resultados (HUANG *et al.*, 2013).

Huang *et al.* (2013) comentam que outras pesquisas também apresentaram dados de módulo de elasticidade maiores aos 365 dias, em concretos com elevados teores de cinza volante quando comparados à

concretos de referência (sem cinza), sendo ambos com valores de resistência à compressão semelhantes em 28 dias. Comparando-se os resultados das amostras com as diferentes cinzas utilizadas, em um ano, os concretos moldados com a cinza volante de 4,6% de perda ao fogo, apresentaram os melhores resultados.

#### 2.4.3.3 Efeitos das condições de cura

O desempenho no estado endurecido do concreto, principalmente quando se incorpora materiais cimentícios complementares, é diretamente influenciado pelas condições de cura (RAMEZANIANPOUR; MALHOTRA, 1995), como umidade, temperatura e o tempo (idade de cura).

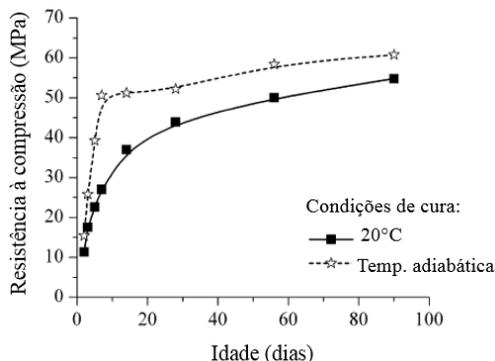
Quanto à temperatura, Escalante-García e Sharp (2001), verificaram em pastas de cimento misturado com 30% de cinza volante e relação a/mc de 0,50, em temperaturas de cura de 10°C até 60°C, que até a idade de 28 dias a resistência à compressão foi elevada com o aumento da temperatura, entre 40°C e 60°C. No entanto, em 180 e 365 dias, houve uma inversão de resultados, onde os valores mais baixos foram obtidos nestas mesmas temperaturas, e os mais elevados para as amostras curadas a 20°C e 30°C. A mesma tendência foi observada para pastas de cimento puro.

Através de análises com microscópio eletrônico de varredura, também ficou evidente a maior porosidade de pastas curadas a 60°C comparadas as pastas submetidas a cura em 10°C, além da maior porosidade em pastas com cinza volante comparadas às pastas sem a incorporação da pozolana (ESCALANTE-GARCÍA; SHARP, 2001).

Observações também foram feitas por Weerdt *et al.* (2012), os quais verificaram que a reação pozolânica da cinza volante é acrescida para temperaturas de cura entre 20°C e 40°C, mas de forma diferenciada do cimento. A reação pozolânica é acelerada por um período de tempo mais longo, enquanto que a reação do cimento ocorre principalmente durante os primeiros 7 dias, derivando em uma distribuição menos homogênea de produtos de hidratação, com aumento na porosidade capilar e resistências mais baixas em idades mais avançadas, comparadas à temperaturas de cura da ordem de 5°C. Do contrário, temperaturas de cura de 20°C e 40°C reduzem a porosidade de sistemas cimentícios com cinza volante aos 180 dias, enquanto que a uma temperatura de 5°C a taxa de reação é de aproximadamente 30%, causando desta forma a redução de propriedades mecânicas.

Mengxiao, Qiang e Zhikai (2015) testaram o desempenho mecânico de concretos com 45% de cinza volante classe F substituindo o cimento comum em massa, com consumo de ligante de  $400 \text{ kg/m}^3$  e relação a/mc de 0,42, para diferentes condições de temperatura de cura. Na primeira condição, o concreto foi mantido a  $20^\circ\text{C}$  durante todo o período de cura, e na outra situação, as amostras foram submetidas a mesma temperatura conforme a curva de aumento da temperatura adiabática do concreto. A temperatura adiabática alcançada aos 9 dias foi de aproximadamente  $54^\circ\text{C}$ . A Figura 9 apresenta os valores encontrados de resistência à compressão dos concretos curados em diferentes condições, para as idades de 2, 3, 5, 7, 14, 28, 56 e 90 dias.

Figura 9: Resistência à compressão do concreto sob diferentes condições de cura

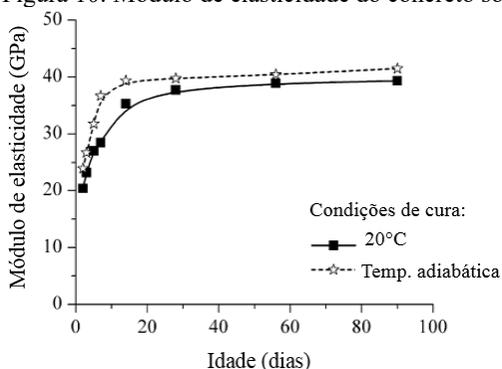


Fonte: adaptada de Mengxiao, Qiang e Zhikai (2015).

A resistência à compressão do concreto curado seguindo a mesma elevação da temperatura adiabática foi maior do que a do concreto curado a  $20^\circ\text{C}$  em todas as idades, sendo que, aos 7 dias o valor encontrado foi superior em 87,41%. A reação da cinza volante aumenta significativamente elevando-se a temperatura de cura, e por consequência, aumenta-se a resistência dos concretos. Um dos motivos, é o melhoramento da zona de transição devido ao consumo do hidróxido de cálcio pela reação pozolânica, que também será maior em temperaturas mais elevadas (MENGXIAO; QIANG; ZHIKAI, 2015).

Diferenças menos expressivas foram observadas nos valores de módulo de elasticidade, especialmente em idades maiores, conforme ilustrado na Figura 10.

Figura 10: Módulo de elasticidade do concreto sob diferentes condições de cura



Fonte: adaptada de Mengxiao, Qiang e Zhikai (2015).

Mengxiao, Qiang e Zhikai (2015) comentam que, como as características da pasta e zona de transição são influenciadas diretamente pela temperatura, justifica-se as maiores diferenças observadas nos valores de resistência à compressão para as duas condições de cura, em comparação aos resultados de módulo de elasticidade, que é mais influenciado pelos agregados.

Salum (2016) produziu concretos com resistência característica à compressão de 35 e 45 MPa, aos 28 dias. Em ambos os casos substituições de cimento por cinza volante foram realizadas em teores de 0%, 15% e 30% (em volume). Os concretos foram submetidos a condições de cura diferentes, sendo uma à temperatura de 23°C (referência), e as demais simulando o comportamento térmico no interior (picos de temperatura entre 58°C e 73°C) e no topo (picos de temperatura entre 45°C e 55°C) de um bloco de concreto.

De forma geral, os concretos curados termicamente apresentaram valores de resistência à compressão superiores comparados aos das misturas de referência. Este desempenho foi proveniente da aceleração das reações de hidratação do cimento e pozolânicas devido ao calor em ambas condições de cura. No entanto, o regime de cura de topo foi o que proporcionou os melhores resultados dentre as condições de cura térmica. Possivelmente, este comportamento ocorreu devido as reações acontecerem mais lentamente, melhorando a distribuição dos produtos de hidratação e resultando em uma estrutura mais resistente. Quanto ao módulo de elasticidade estático, os concretos curados termicamente apresentaram valores superiores aos que foram curados em 23°C (SALUM, 2016).

Atis (2005) verificou a influência da cura seca e úmida, ambas a 20°C, em concretos com teores de cinza volante de 50% e 70%. Ficou evidente que o desempenho mecânico de concretos com altos níveis de cinza volante não é dependente apenas do tempo de cura, visto que estes demonstraram também ser mais vulneráveis em condição de cura seca do que concretos feitos apenas com cimento. Além disso, quanto maior o teor de substituição de cimento, maior a vulnerabilidade. Resistências à compressão, obtidas aos 365 dias, para concretos vibrados com 0%, 50% e 70% de cinza volante em cura úmida, apresentaram valores maiores em aproximadamente 13%, 39% e 67%, respectivamente, quando comparados aos concretos correspondentes submetidos à cura seca.

#### **2.4.4 Considerações**

Por meio das bibliografias consultadas, foi possível perceber que a grande maioria dos CAAs com teores elevados de cinza volante apresentaram efeitos benéficos quanto aos quesitos de trabalhabilidade. Dentre eles destaca-se a possibilidade de redução de água para uma mesma quantidade de ligante, ou ainda, a redução do consumo de aditivo.

Avaliações de elevação de temperatura semiadiabática comprovaram que o calor de hidratação de misturas cimentícias com elevados teores de cinza volante tende a reduzir. No entanto, nestas verificações ocorrem trocas de calor com o ambiente, não representando o real comportamento de grandes blocos de concreto em que o centro do elemento encontra-se praticamente em condições adiabáticas. Além disso, as reações de hidratação do cimento e pozolânicas aumentam com a elevação da temperatura podendo elevar também a geração de calor na estrutura.

Propriedades de resistência à compressão e módulo de elasticidade são largamente impactadas por níveis elevados de cinza volante em substituição ao cimento. Percebe-se, na literatura verificada, que há concordância quanto às reduções nos valores de ambas as propriedades, principalmente para curtos períodos de cura, como 28 dias. No entanto, em idades superiores não há consenso quanto ao efeito ocasionado pela utilização de cinza volante em grandes quantidades. Neste caso, há de se levar em consideração a influência de diferentes teores e diferentes cinzas volantes utilizadas.

A utilização de metacaulim em misturas ternárias parece minimizar os efeitos da utilização de elevados teores de cinza. No

entanto, esta minimização ocorre em todos os aspectos, incluindo os benefícios na redução da elevação da temperatura.

Por isso, avaliações quanto ao desempenho da utilização de cinzas volantes nacionais em volumes elevados no CAA faz-se necessário.

### 3. PROGRAMA EXPERIMENTAL

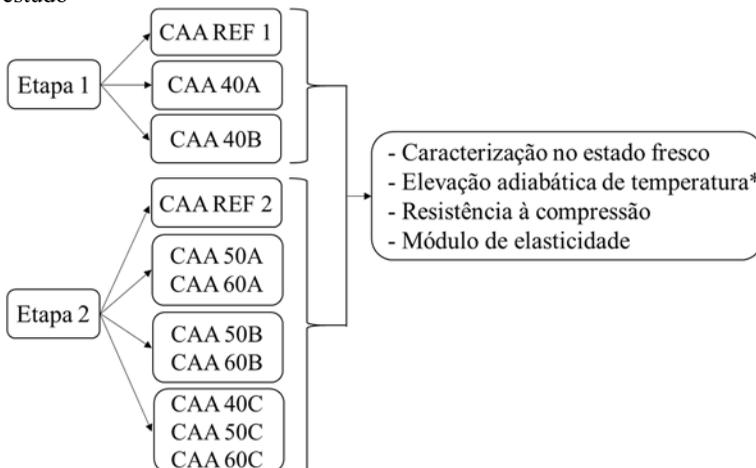
Desenvolveu-se o programa experimental deste trabalho a fim de atender aos objetivos específicos, que se resumem em avaliar propriedades de autoadensabilidade, elevação adiabática de temperatura, resistência à compressão e módulo de elasticidade de CAAs com elevados teores de cinza volante para aplicação em grandes blocos de fundação. Desse modo, para que melhor se compreenda a estrutura experimental desenvolvida, uma breve descrição está apresentada a seguir.

Inicialmente, definiu-se os percentuais de cinza volante para substituição do cimento, sendo estes de 40%, 50% e 60% em volume. Outro parâmetro definido foi a utilização de três amostras distintas de cinza volante, denominadas como cinza volante A (CVA), CVB e CVC, conforme detalhado posteriormente.

Como ponto de partida, um CAA de referência (CAA REF), somente com cimento, foi desenvolvido e, a partir deste, realizadas as substituições de cimento por cinza volante. Todavia, ressalta-se que neste trabalho buscou-se desenvolver CAAs com elevados teores de cinza volante com características mínimas aceitáveis para aplicação. Em função disso, cada traço apresenta suas particularidades. Desse modo, não se realizou apenas a substituição do cimento pela cinza volante, com a avaliação dos efeitos causados, mas sim com correção ou melhoramento dos concretos, caso necessário.

A Figura 11 ilustra a estrutura principal deste programa experimental. Atenta-se que a denominação CAA 40A, apresentada na figura a seguir, representa o concreto autoadensável com 40% de CVA substituindo o cimento. O mesmo ocorre para os demais percentuais e cinzas volantes.

Figura 11: Estrutura principal do programa experimental desenvolvido neste estudo



\* Ensaio não realizado para todos os CAAs.

Para desenvolvimento e avaliação do programa experimental, ensaios de caracterização dos materiais, em especial das amostras de cinza volante, foram realizados. Além disso, conforme exposto na Figura 11, a execução dos CAAs foi realizada em duas etapas. Definiu-se por esta divisão devido à utilização de diferentes lotes de cimento (mesmo tipo e marca de cimento, porém com datas de fabricação diferentes) e de métodos distintos para ajuste dos traços em cada etapa. No entanto, estes e outros detalhes estão melhor apresentados no decorrer deste trabalho.

### 3.1 SELEÇÃO E CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS

Destaca-se que os processos desenvolvidos no programa experimental, com exceção dos ensaios de elevação adiabática de temperatura dos CAAs, foram realizados na Universidade do Oeste de Santa Catarina (UNOESC), localizada na cidade de Joaçaba-SC. Desse modo, utilizou-se materiais disponíveis nesta região comumente utilizados na execução de concretos, com exceção das amostras de cinza volante e metacaulim. Além disso, neste capítulo apresentam-se dados fornecidos pelos respectivos fabricantes do cimento, metacaulim e aditivo superplastificante, assim como informações encontradas nos

ensaios de caracterização de todos os materiais utilizados. No entanto, os resultados finais dos ensaios realizados, e a avaliação dos mesmos, estão apresentados posteriormente no Capítulo 4.

### 3.1.1 Cimento Portland

O cimento utilizado foi o CP V-ARI da marca Supremo Cimentos. Definiu-se pela utilização deste cimento, visto a baixa quantidade de adições presentes em sua composição, buscando-se uma maior efetividade na posterior avaliação do desempenho das cinzas, quando inseridas no concreto em sua substituição.

Atenta-se ao fato de que foram utilizados dois lotes de cimento para desenvolvimento deste programa experimental, porém ambos da mesma marca e tipo. Desse modo, as Etapas 1 e 2 desta pesquisa foram realizadas com o cimento do Lote 1 e 2, respectivamente.

Características desses dois lotes de cimento foram fornecidas pelo fabricante e estão apresentadas na Tabela 11.

Tabela 11: Características do cimento CP V - ARI (dados fornecidos pelo fabricante)

	Lote 1	Lote 2*
Composição química (%)		
SiO <sub>2</sub>	18,94	18,17
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	4,70	4,45
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	3,05	2,76
CaO	62,29	58,53
MgO	6,34	5,76
SO <sub>3</sub>	2,93	3,04
K <sub>2</sub> O	0,99	0,97
Na <sub>2</sub> O	0,27	0,26
Cl <sup>-</sup>	0,01	0,01
CO <sub>2</sub>	2,50	2,90
Cal livre	0,70	0,56
Perda ao fogo	3,31	3,54
Resíduo insolúvel	0,99	1,08
Blaine (cm <sup>2</sup> /g)	4311	4431
Resistência à compressão (MPa)		
1 dia	25,6	25,8
3 dias	35,9	37,0
7 dias	39,7	41,2
28 dias	50,7	48,7

\* Valores médios.

Os valores da composição potencial dos cimentos (método de Bogue) foram encontrados conforme preconiza a ASTM C 150 (2017) e estão apresentados na Tabela 12.

Tabela 12: Composição potencial dos cimentos (método de Bogue)

	Lote 1	Lote 2
Mineralógica - Bogue (%)		
C <sub>3</sub> S	65,35	57,68
C <sub>2</sub> S	5,00	8,58
C <sub>3</sub> A	7,29	7,12
C <sub>4</sub> AF	9,28	8,40

A massa específica do cimento foi determinada conforme recomenda a NBR NM 23 (2001), apresentando valor médio de 3,14 g/cm<sup>3</sup>. As propriedades do cimento utilizado atendem à NBR 5733 (1991).

Para complementar a caracterização deste material, realizou-se a verificação da distribuição granulométrica das partículas. Entretanto, esta análise foi feita apenas para o cimento do Lote 2. O ensaio foi desenvolvido por meio de granulometria a laser, via seca, através da utilização do equipamento Microtec 53500 do Laboratório de Aplicações de Nanotecnologia em Construção Civil (NANOTEC) da UFSC.

### 3.1.2 Agregados

Conforme mencionado anteriormente, utilizou-se agregados disponíveis no Meio Oeste Catarinense. Sendo assim, tanto o agregado graúdo, quanto um dos agregados miúdos utilizados, são de origem basáltica. Estes agregados foram disponibilizados pela Pedreira Triângulo, a qual realiza a extração e britagem da rocha na cidade de Ibicaré - SC. Ressalta-se também que o processo de britagem final destes agregados foi realizado em britador de impacto de eixo vertical (VSI), que tende a reduzir a lamelaridade dos grãos.

Neste trabalho, o agregado miúdo proveniente do basalto é denominado de areia de britagem. Utilizou-se também areia natural fina de rio para composição da fração granulométrica. Esta última foi obtida em uma loja de materiais de construção na cidade de Joaçaba-SC.

A caracterização dos agregados foi realizada por meio dos ensaios de teor de material pulverulento (NBR NM 46, 2003), composição granulométrica - determinação da dimensão máxima

característica (DMC) e módulo de finura (NBR NM 248, 2003). A massa específica aparente seca foi determinada conforme preconiza NBR NM 53 (2009) para o agregado graúdo e NBR NM 52 (2009) para a areia fina. Para a determinação da massa específica aparente da areia de britagem, utilizou-se o processo do picnômetro.

Na Tabela 13 encontram-se os percentuais retidos acumulados nas peneiras utilizadas para classificação granulométrica dos agregados, assim como as demais características verificadas.

Tabela 13: Caracterização física dos agregados utilizados

Abertura peneira (mm)	% retida acumulada		
	Brita 0	Areia britagem	Areia fina
12,5	0	0	0
9,5	0	0	0
6,3	54	0	0
4,75	86	0	0
2,36	99	18	0
1,18	99	53	0
0,6	99	68	2
0,3	99	76	34
0,15	99	81	87
Fundo	100	100	100
DMC (mm)	9,5	4,75	0,6
Módulo de finura	5,82	2,97	1,24
Material pulverulento (%)	0,6	15,7	2,0
Massa específica aparente (g/cm <sup>3</sup> )	2,81	2,87	2,61

Para utilização da areia de britagem, fez-se a exclusão dos grãos maiores que 3,36 mm por meio de peneiramento. Esta decisão foi tomada a fim de reduzir o percentual de material grosso, visto que, segundo Weidmann (2008, p. 13), há uma concordância na literatura que, “[...] areias demasiadamente grossas, com excesso de material acima da peneira 2,36 mm (granilha), normalmente conduzem a concretos ásperos, pouco trabalháveis e com tendência à segregação.”. Além disso, buscou-se reduzir o módulo de finura deste agregado. Sendo assim, os valores de caracterização apresentados na Tabela 13 referem-se à areia de britagem após o peneiramento.

Ressalta-se também que, apesar da areia de britagem ter apresentado teor de material pulverulento superior ao indicado pela NBR 7211 (2009), julgou-se, neste caso, que os finos presentes em excesso pudessem contribuir positivamente na coesão do CAA. Desta forma, manteve-se a fração total de pulverulento deste agregado nos concretos executados.

### 3.1.3 Aditivo

Para desenvolvimento dos CAAs, utilizou-se o aditivo superplastificante, Tec Flow 8000, produzido pela *Grace Construction Products*. Este aditivo, de acordo com o fabricante, apresenta alto poder de redução de água e é indicado para aplicação em concretos autoadensáveis. Informações adicionais fornecidas pelo fabricante estão apresentadas na Tabela 14.

Tabela 14: Características do aditivo (dados fornecidos pelo fabricante)

Propriedade	Aditivo Tec Flow 8000
Base química principal	Policarboxilatos
Aspecto/Cor	Líquido alaranjado
Massa específica (g/cm <sup>3</sup> )	1,10 (± 0,02)
Teor de sólidos (%)	46,68 (± 2,33)
pH	5,50 (± 1)

### 3.1.4 Água

A água utilizada nos procedimentos de dosagem dos CAAs foi proveniente da rede de abastecimento do Serviço Intermunicipal de Água e Esgoto (SIMAE), da cidade de Joaçaba-SC, a qual é utilizada no Laboratório de Materiais da UNOESC.

Para realização do ensaio de elevação adiabática de temperatura, a reprodução dos traços dos CAAs foi realizada utilizando a água disponível no Laboratório de Materiais de Construção Civil (LMCC) da UFSC, com procedência da rede de abastecimento da Companhia Catarinense de Águas e Saneamento (CASAN).

### 3.1.5 Cinza volante

Com a finalidade de avaliar o comportamento de CAAs com substituição de cimento por cinzas volantes com características distintas, definiu-se pela utilização de cinzas provenientes de diferentes fontes. Para tal, uma das amostras foi proveniente do Complexo Termelétrico de Candiota, localizado em Candiota-RS, denominada neste trabalho de Cinza Volante A (CVA), e a outra teve origem no Complexo Termelétrico Jorge Lacerda, localizado em Capivari de Baixo-SC, denominada de Cinza Volante B (CVB).

Cada cinza volante mencionada foi coletada em uma concreiteira diferente da região da Grande Florianópolis. Em função disso, não foi realizado nenhum tipo de beneficiamento dessas amostras. Buscou-se, nesta situação, verificar como seria o comportamento de ambas as cinzas quando inseridas no CAA, visto que, na forma que foram coletadas, eram aplicadas na mistura dos concretos em suas respectivas centrais dosadoras.

Utilizou-se ainda uma amostra de cinza volante moída, também proveniente da Usina Termelétrica Jorge Lacerda, a qual está identificada neste trabalho como Cinza Volante C (CVC). Esta terceira amostra de cinza volante objetivou principalmente a complementação da avaliação dos CAAs quanto aos parâmetros de autoadensabilidade, conforme descrito posteriormente.

Os ensaios realizados para caracterização das cinzas volantes estão descritos a seguir.

#### 3.1.5.1 Ensaios de caracterização das cinzas volantes

A determinação da perda ao fogo foi realizada seguindo-se os procedimentos do Método 1 apresentado pela NBR NM 18 (2012), que se refere a materiais sem a presença de escória granulada de alto-forno. Para tal, as amostras foram calcinadas em mufla durante 50 minutos, em temperatura de 950°C. A mufla utilizada é da marca Jung e pertence ao Laboratório de Engenharia Mecânica da UNOESC-Joaçaba.

Quanto à massa específica, utilizou-se como parâmetro a NBR NM 23 (2001). As amostras de cinza volante, banho termostático e líquido para verificação do volume deslocado no frasco *Le Chatelier* (neste caso querosene) foram mantidos em ambiente climatizado, para estabilização da temperatura, por um período aproximado de 24 h anteriormente à realização dos ensaios.

Para verificação da distribuição granulométrica das amostras de cinza volante, utilizou-se o mesmo processo descrito anteriormente no item 3.1.1.

##### 3.1.5.1.1 *Índice de desempenho com cimento Portland*

Para verificação do índice de desempenho com cimento Portland aos 28 dias, seguiu-se as instruções da NBR 5752 (2014). Para tal, a argamassa para moldagem dos corpos de prova cilíndricos foi executada utilizando-se cimento CP II F-32 (marca Supremo Cimentos),

areia normal (NBR 7214, 2015) em quatro frações iguais, água e, nos casos em questão, cinza volante, especificados pela referida norma.

Procedimentos de mistura, moldagem, cura e rompimento atenderam ao estipulado pela NBR 7215 (1997). Seis corpos de prova cilíndricos, de 5 cm de diâmetro e 10 cm de altura, foram moldados para cada argamassa. Na Figura 12, estão apresentados alguns dos processos desenvolvidos.

Figura 12: Ensaio de índice de desempenho com cimento Portland: a) verificação do índice de consistência; b) moldagem dos corpos de prova



A NBR 5752 (2014) cita a utilização de aditivo superplastificante nas argamassas com pozolana apenas quando o valor de índice de consistência, verificado conforme NBR 7215 (1997), for inferior a 10 mm da argamassa de referência (apenas com cimento). Conforme exposto na Tabela 15, não foi necessário em nenhum dos casos a utilização de aditivo.

Tabela 15: Índice de consistência das argamassas para verificação do índice de desempenho com cimento Portland

Identificação da mistura	Índice de consistência (mm)
100% cimento	170
CVA	163
CVB	166
CVC	170

### 3.1.5.1.2 *Chapèlle modificado*

O método *Chapèlle* modificado visa à determinação do índice de atividade pozolânica de materiais, por meio da determinação do teor de hidróxido de cálcio fixado (NBR 15895, 2010).

Para execução do ensaio, utilizou-se apenas as partículas das cinzas menores que 0,075 mm. O ensaio seguiu os procedimentos da NBR 15895 (2010). Desse modo, determinou-se a massa de 1,0000

grama (g) de material pozolânico ( $m_2$ ) e 2,0000 g de óxido de cálcio (CaO). Este último foi preparado no momento da realização do ensaio através da calcinação a 1000°C do carbonato de cálcio ( $\text{CaCO}_3$ ). Os materiais foram misturados com 250 mililitros (mL) de água destilada e colocados em banho-maria com agitação mecânica, por um período de 16 h à temperatura de 90°C.

Posteriormente, após resfriamento, adicionou-se ao conteúdo inicial 250 mL de solução de sacarose, recém-preparada. Homogeneizou-se a solução durante 15 minutos por meio de agitação magnética, realizando-se imediatamente a filtração da solução e titulação com solução de ácido clorídrico (HCl) - 0,1 M (Figura 13). Utilizou-se fenolftaleína como indicador. Para cada cinza volante, foram realizadas duas verificações. Os mesmos procedimentos foram executados com o ensaio em branco (sem pozolana).

Figura 13: Titulação da solução filtrada com HCl (frasco à esquerda, solução antes da titulação e frasco à direita, solução após titulação)



O índice de atividade pozolânica *Chapelle* foi determinado empregando-se a Equação 1.

$$I_{\text{Ca(OH)}_2} = \frac{28(V_3 - V_2)F_c}{m_2} 1,32 \quad (1)$$

Em que:

$I_{\text{Ca(OH)}_2}$  = índice de atividade pozolânica *Chapelle*, correspondente ao teor de hidróxido de cálcio fixado, expresso em miligramas (mg) de  $\text{Ca(OH)}_2$  por g de material;

$m_2$  = é a massa de material pozolânico, expressa em gramas (g);

$V_2$  = volume de HCl 0,1 M consumido no ensaio com a amostra, expresso em mL;

$V_3$  = volume de HCl 0,1 M consumido no ensaio em branco, expresso em mL;

$F_c$  = fator de correção do HCl para concentração de 0,1 M;  
 1,32 = relação molecular  $\text{Ca}(\text{OH})_2/\text{CaO}$ .

### 3.1.6 Metacaulim

Como ligante complementar, para ajuste das propriedades requeridas para o estado fresco dos CAAs, utilizou-se o Metacaulim HP Ultra. Este material foi fornecido pela empresa Metacaulim do Brasil, a qual produz e comercializa o produto para aplicação em concretos. As características desta adição, correspondentes a valores médios, podem ser observadas na Tabela 16.

Tabela 16: Características do metacaulim (dados fornecidos pelo fabricante)

Propriedade	Metacaulim HP Ultra
Composição química (%)	
SiO <sub>2</sub>	57
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	34
CaO + MgO	< 0,1
SO <sub>3</sub>	< 0,1
Na <sub>2</sub> O	< 0,1
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	2
TiO <sub>2</sub>	1,5
Perda ao fogo	3
Desempenho com cimento Portland aos 7 dias (%)*	115
Resíduo na peneira 45 µm (%)	6
Área específica BET (cm <sup>2</sup> /g)	230000
Massa específica (g/cm <sup>3</sup> )	2,56

\* Metodologia de ensaio conforme NBR 15894-2 (2010).

Os valores apresentados na Tabela 16 atendem aos requisitos da NBR 15894-1 (2010).

A fim de uma melhor avaliação da aplicação do metacaulim nos CAAs executados nesta pesquisa, realizou-se os ensaios de desempenho com cimento Portland aos 28 dias e *Chapèlle* modificado. Os ensaios mencionados foram realizados, respectivamente, seguindo a NBR 5752 (2014) e NBR 15895 (2010), da mesma forma como ocorreu com as amostras de cinza volante. Em função disso, a argamassa, para verificação do desempenho com cimento Portland, foi realizada com 25% em massa de metacaulim em substituição ao mesmo teor de cimento. O índice de consistência desta argamassa foi de 166 mm. Uma vez que a argamassa de referência (100% cimento) apresentou espalhamento de 170 mm, conforme exposto anteriormente na Tabela

15, não foi necessária a utilização de aditivo superplastificante na mistura com metacaulim.

### 3.2 MÉTODOS PARA COMPOSIÇÃO E AVALIAÇÃO DOS CAAS

Inicialmente, destaca-se que todos os materiais sólidos utilizados, com exceção do cimento e do metacaulim, foram secos em estufa a  $(105 \pm 5)^\circ\text{C}$ , sendo posteriormente armazenados em recipientes fechados com tampa. No caso do cimento e do metacaulim, toda a quantidade adquirida foi colocada em sacos plásticos, os quais foram devidamente fechados e posteriormente armazenados nos recipientes. Ressalta-se, ainda, que todos os materiais permaneceram em ambiente climatizado com temperatura entre  $20^\circ\text{C}$  e  $23^\circ\text{C}$ , por um período mínimo de 24 h para estabilização da temperatura, anteriormente aos processos de mistura.

Quanto aos equipamentos utilizados para a mistura dos materiais, utilizou-se uma argamassadeira com capacidade de 5 L, com velocidade em torno do eixo de 140 e 285 rpm e, para movimento planetário, de 62 e 125 rpm, para baixa e alta velocidade, respectivamente (dados fornecidos pelo fabricante). Utilizou-se também uma betoneira de eixo inclinado com capacidade de 120 L e rotação do tambor de 30 rpm.

Referente aos procedimentos para verificação do espalhamento de argamassas e CAAs misturados na argamassadeira, os quais serão descritos posteriormente, utilizou-se a mesa para índice de consistência, a qual está localizada em ambiente sem climatização. Porém, os processos de mistura foram todos realizados em local com temperatura controlada. Observa-se também que o molde de tronco de cone utilizado nos ensaios possuía dimensões de 125 mm de diâmetro na abertura inferior, 80 mm na abertura superior e 65 mm de altura.

Ressalta-se ainda que, devido à grande quantidade de cimento utilizada em tentativas de ajustar os CAAs com a CVA e CVB, conforme abordado subsequentemente, a quantidade inicialmente coletada de cimento não seria suficiente para o desenvolvimento de toda a pesquisa. Deste modo, optou-se pela utilização de um segundo lote de cimento CP V - ARI para complementação deste estudo. Em função disso, decidiu-se pela divisão dos CAAs em duas partes, sendo estas denominadas de Etapa 1 e Etapa 2, executadas com os cimentos do Lote 1 e Lote 2, respectivamente. Além do mais, diferentes metodologias

foram utilizadas para adequação dos traços em ambas as etapas, sendo estas descritas na sequência.

### **3.2.1 Concretos autoadensáveis produzidos na Etapa 1**

#### **3.2.1.1 Concreto autoadensável de referência da Etapa 1 (CAA REF 1)**

A dosagem do CAA de referência (CAA REF 1) seguiu a metodologia utilizada pelo GTec, descrita anteriormente. Em resumo, definiu-se o volume de água e ligante, assim como a fixação volumétrica de argamassa ( $\alpha$  volumétrico) e agregado graúdo, com posterior ajuste do teor de aditivo.

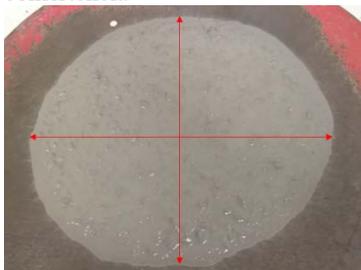
A metodologia utilizada para desenvolvimento deste traço de CAA está descrita, em sua maioria, no Apêndice B. Sendo assim, apenas os pontos de maior relevância estão mencionados a seguir para compreensão do processo.

Por meio de ensaios prévios, definiu-se pela utilização de um volume de água de 200 L/m<sup>3</sup> e relação a/c de 0,38, a qual resultou em um consumo de cimento aproximado de 526,3 kg/m<sup>3</sup> (167,6 L/m<sup>3</sup>). A partir de avaliações de espalhamento em argamassas, com diferentes teores de cada agregado miúdo, decidiu-se pela utilização de uma composição de 45% de areia fina e 55% de areia de britagem, em volume. A curva granulométrica desta composição de agregados é apresentada no item 4.1.1.

O CAA REF 1 foi composto por 46% de agregado miúdo em relação ao volume total de argamassa. O volume de argamassa no concreto foi de 68% ( $\alpha$  volumétrico), o que corresponde a um volume de 32% de agregado graúdo.

O ajuste do teor de aditivo no CAA REF 1 foi realizado por intermédio de misturas desenvolvidas inicialmente na argamassadeira. Esta metodologia foi adotada a fim de relacionar valores de espalhamento obtidos na mesa de consistência (para CAAs misturados na argamassadeira) com valores obtidos no ensaio de *slump flow* (para CAAs misturados em betoneira), sendo ambos idênticos na composição (traço), porém misturados com volumes distintos. Em ambos os casos, utilizou-se a média de duas verificações diametralmente opostas, conforme exemplo apresentado na Figura 14.

Figura 14: Verificação do espalhamento do CAA na mesa para índice de consistência



O procedimento de mistura em argamassadeira ocorreu da seguinte forma:

- colocação de todos os materiais secos dentro da cuba, areias e cimento;
- mistura em velocidade lenta por 60 s;
- adição de aproximadamente 80% da água, em tempo aproximado de 15 s, com a pá em movimento;
- mistura por mais 45 s;
- com o misturador em repouso, raspava-se a argamassa aderida à cuba e à pá, adicionando o aditivo na sequência;
- mistura em velocidade lenta por mais 30 s;
- adição do restante da água, utilizada para retirar sobras de aditivo do recipiente dosador;
- mistura em velocidade alta por 60 s;
- adição do agregado graúdo;
- mistura em velocidade lenta por 60 s;
- tempo total de mistura de 4 min 30 s.

Inicialmente, buscava-se desenvolver misturas em argamassadeira que apresentassem espalhamento, verificado na mesa de índice de consistência, de 280 mm a 300 mm. Entretanto, verificou-se que as misturas com valores de espalhamento superiores a 300 mm apresentavam melhores resultados quanto à fluidez e viscosidade. Deste modo, um novo limite foi adotado, sendo este de 300 mm a 310 mm.

Após verificação do espalhamento, as misturas eram deixadas em repouso sobre a placa da mesa por tempo mínimo de 60 s, para verificar visualmente sinais de exsudação, como por exemplo, elevado brilho superficial devido à presença de água. Depois deste período,

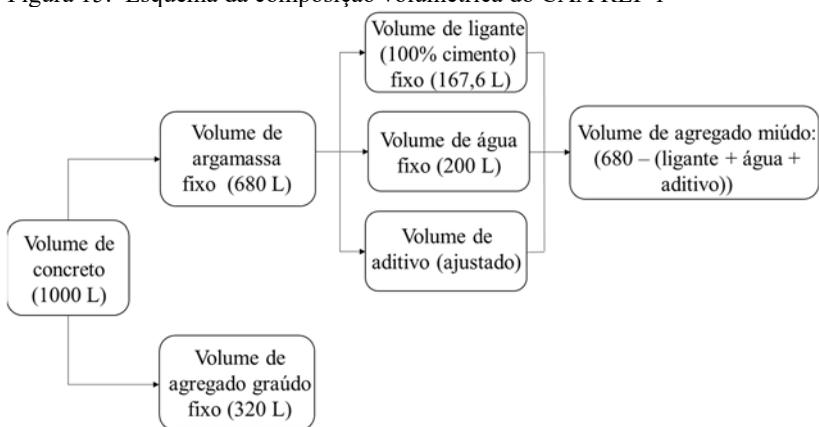
raspava-se a mistura com uma espátula metálica, examinando se havia ou não segregação do material fino. Com o restante do CAA, que ficava em repouso dentro de um recipiente, verificava-se a ocorrência ou não de segregação do agregado graúdo.

Ao executar um CAA em argamassadeira, com teor de aditivo que atendesse aos parâmetros mencionados, o mesmo era reproduzido na betoneira. Neste caso, os procedimentos de mistura ocorreram da seguinte forma:

- colocação de todos os materiais secos dentro da cuba, na sequência de areias, cimento e pedrisco;
- mistura por 60 s, com a abertura da cuba protegida com plástico para evitar perdas de material fino (pó);
- adição de aproximadamente 80% da água, em tempo aproximado de 15 s, com a betoneira em movimento;
- mistura por mais 1 min 45 s;
- com a betoneira em repouso, raspava-se o material aderido à cuba e adicionava-se o aditivo;
- mistura por mais 30 s;
- adição do restante da água utilizada para retirar sobras de aditivo do recipiente dosador;
- mistura por 1 min;
- tempo total de mistura de 4 min 30 s.

O CAA com valor de espalhamento de 305 mm foi o que apresentou os melhores resultados nos ensaios de caracterização quando reproduzido em betoneira. Os consumos de materiais, utilizados na dosagem deste CAA (em massa e volume) estão apresentados no Apêndice C. Na Figura 15, encontra-se um resumo da estrutura utilizada para compor o traço de referência (em volume).

Figura 15: Esquema da composição volumétrica do CAA REF 1



Ressalta-se que o volume total de água de  $200 \text{ L/m}^3$  é correspondente à água de mistura mais o percentual de voláteis do aditivo. Esta compensação no volume de água (para cada dosagem de aditivo) foi realizada para todos os CAAs desenvolvidos posteriormente.

Percebe-se na Figura 15 que, com os volumes de agregado graúdo e argamassa fixos (para  $1 \text{ m}^3$  de concreto), e dentro do volume de argamassa, os volumes de ligante e água também fixos, pequenas variações ocorriam no volume de agregado miúdo em relação à dosagem de aditivo testada a cada situação. No entanto, em termos de  $1 \text{ m}^3$ , estas variações são praticamente irrelevantes. De qualquer forma, a cada dosagem de aditivo avaliada, fez-se a correção destas quantidades, porém mantendo sempre constantes os percentuais volumétricos de cada areia.

Destaca-se que, com os valores de espalhamento obtidos na mesa de consistência, buscava-se obter valores de espalhamento no ensaio de *slump flow* de  $(700 \pm 50) \text{ mm}$ . Quanto à viscosidade plástica aparente, limitou-se inicialmente valores de tempos de escoamento pelo funil V de 9 s a 15 s. No entanto, em função dos resultados obtidos, uma faixa mais abrangente foi utilizada, conforme descrito posteriormente. Caso o CAA executado na betoneira não atendesse aos parâmetros aceitáveis para o estado fresco, uma nova mistura era realizada, ajustando-se novamente o teor de aditivo.

### 3.2.1.2 CAAs com 40% de CVA e CVB substituindo o cimento

A partir do CAA REF 1, iniciou-se a confecção dos traços com 40% de CVA e CVB substituindo o cimento, em volume. Inicialmente, mantendo o mesmo volume de cada componente do traço padrão, apenas 40% do volume de cimento era substituído pelo mesmo volume de cinza volante. A mistura deste CAA era realizada em argamassadeira, para verificação do espalhamento e comportamento quanto à segregação e/ou exsudação. Da mesma forma que no CAA REF 1, buscava-se encontrar valores de espalhamento, na mesa de consistência, entre 300 mm e 310 mm.

Visualmente, para ambas as cinzas utilizadas nesta etapa (CVA e CVB), verificou-se sinais intensos de exsudação, como elevado brilho superficial de água na mistura espalhada sobre a placa da mesa e segregação do material fino. Observou-se, também, pontos de água acumulada superficialmente à mistura, quando parte do volume de CAA era deixado em repouso dentro de um recipiente.

Para corrigir este parâmetro de estabilidade, adotou-se como medida a substituição de areia fina por percentuais volumétricos de cinza volante. O objetivo era inserir um material mais fino que a areia, ou seja, com maior área específica, para correção da exsudação.

O valor de substituição de areia por cinza volante foi limitado a um máximo de 15%, para substituições com acréscimos a cada 2,5%. Este limite foi adotado de forma que o volume total de finos, considerando a soma dos volumes de cimento, pulverulento dos agregados e cinza volante, não ultrapassasse 220 L/m<sup>3</sup>. Desse modo, novos testes foram executados com as misturas novamente realizadas na argamassadeira.

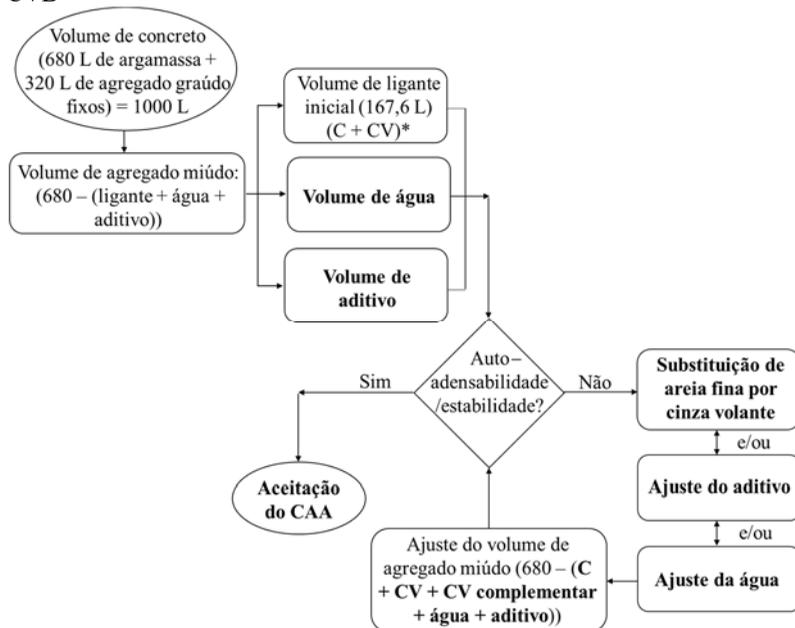
Após estes procedimentos, ao encontrar uma mistura que não apresentasse sinais de exsudação e segregação, caso necessário, era feita a correção do teor de aditivo superplastificante, para atender ao valor de espalhamento definido previamente.

Encontrada uma composição que atendesse ao espalhamento necessário, na mesa de consistência, a mesma era reproduzida na betoneira para comprovação dos parâmetros mínimos estipulados para o estado fresco dos CAAs, da mesma forma como realizado no CAA REF 1. Verificava-se ainda a necessidade ou não de novas correções.

Caso o volume de areia fina substituído pela cinza volante não fosse suficiente para corrigir a exsudação, reduzir o volume de água era a segunda opção, desde que atendidos os parâmetros de autoadensabilidade dos CAAs. No entanto, como na dosagem inicial do traço de referência, os consumos de todos os materiais foram realizados para um volume de 1000 L, reduções no volume de água alterariam este

valor. Desse modo, o volume de água reduzido seria substituído pelo mesmo volume de agregado miúdo (composição de areia fina e de britagem). A partir desta correção, iniciava-se novamente as substituições de areia fina pela cinza volante, e correções do teor de aditivo, repetindo-se os procedimentos de mistura em argamassadeira. Na Figura 16, encontra-se um resumo desses procedimentos.

Figura 16: Esquema da composição volumétrica dos CAAs com 40% de CVA e CVB



\* C = cimento; CV = cinza volante.

Percebe-se que, diferentemente do esquema apresentado para o CAA REF 1 (Figura 15), neste caso, os volumes de ligante e água não são fixos em função das possíveis correções necessárias. Além de que, no caso da substituição da areia fina por cinza volante, o volume de agregado miúdo também altera. Entretanto, independentemente da correção realizada, volumes de argamassa e agregado graúdo foram mantidos constantes.

Os CAAs com substituição de 40% de cimento pela CVA e CVB foram denominados para fins de identificação como CAAs 40A e 40B, respectivamente, mesmo com alterações finais no volume de

materiais cimentícios. Os valores de consumo de cada material e dos ensaios de caracterização no estado fresco destes CAAs estão apresentados em 4.2.

### **3.2.2 Concretos autoadensáveis produzidos na Etapa 2**

Salienta-se que os procedimentos de mistura em betoneira dos CAAs executados na Etapa 2 seguiram os mesmos especificados anteriormente para os CAAs desenvolvidos na Etapa 1.

#### **3.2.2.1 Concreto autoadensável de referência da Etapa 2 (CAA REF 2)**

Em função da utilização de um segundo lote de cimento e da maior sensibilidade do CAA, quando comparado ao concreto convencional vibrado, quanto à alteração de qualquer característica nos materiais de sua composição, um novo traço de referência foi utilizado para a Etapa 2. Para tanto, reproduziu-se o CAA de referência utilizado na Etapa 1 (CAA REF 1), porém utilizando-se o cimento do Lote 2 e ajustando-se o volume de aditivo superplastificante.

Esta decisão foi tomada, pois ao refazer o traço padrão inicial com o cimento do segundo lote, verificou-se diferenças expressivas nos valores de espalhamento, inclusive com evidências de segregação do agregado graúdo na mistura. Este comportamento provavelmente ocorreu em função de pequenas alterações nas características do cimento, conforme dados apresentados anteriormente na Tabela 11.

Para a execução do CAA REF 2, foi necessário reduzir o consumo de aditivo superplastificante em relação ao utilizado no CAA REF 1 (Apêndice C). Deste modo, foi possível obter, em ambos os casos, propriedades semelhantes no estado fresco, conforme demonstrado posteriormente no item 4.2.

#### **3.2.2.2 CAAs com 50% e 60% de CVA e CVB substituindo o cimento**

De imediato, destaca-se que, os CAAs com 50% e 60% de CVA em substituição ao cimento foram denominados de CAAs 50A e 60A, respectivamente, e com 50% e 60% de CVB, de CAAs 50B e 60B, na mesma ordem.

Ressalta-se também que muitas tentativas foram realizadas ainda na Etapa 1 para desenvolvimento dos CAAs com 50% de CVA e CVB substituindo o cimento. Entretanto, em função da granulometria mais grossa destas cinzas, comparadas à do cimento, além das possíveis

diferenças de superfície das partículas destes materiais, uma forte exsudação foi verificada. Misturas incorporando metacaulim, além de outros materiais finos, também foram avaliadas na primeira etapa e, portanto, com a utilização do cimento do Lote 1. No entanto, apenas a incorporação do metacaulim proporcionou os resultados esperados para tais CAAs. Todavia, estes primeiros testes foram utilizados apenas como parâmetro inicial de avaliação do comportamento no estado fresco dos CAAs com 50% de CVA e CVB, sendo a abordagem geral deste processo descrita no Apêndice B.

Devido à utilização do segundo lote de cimento na Etapa 2, adotou-se a composição do CAA REF 2 para execução dos CAAs faltantes. A metodologia empregada para desenvolvimento dos CAAs com substituição do cimento pela CVA e CVB, em 50% e 60%, seguiu basicamente aquela utilizada na correção da exsudação dos concretos com 40% de cinza volante, salvo algumas exceções como:

- no lugar da cinza volante substituir a areia fina, em volume, utilizou-se o metacaulim;
- as misturas de teste para ajuste dos traços foram desenvolvidas diretamente na betoneira. Sendo assim, na Etapa 2, não realizou-se a fase inicial de mistura dos CAAs em argamassadeira.

A opção pela avaliação do comportamento dos CAAs misturados diretamente na betoneira foi adotada devido à maior facilidade quanto à adequação do teor de aditivo e, principalmente, quanto à verificação da viscosidade das misturas. Além do mais, a fase de ajustes dos traços seguindo a metodologia empregada na Etapa 2, abordada na sequência, demonstrou ser menos laboriosa comparada com aquela utilizada na Etapa 1.

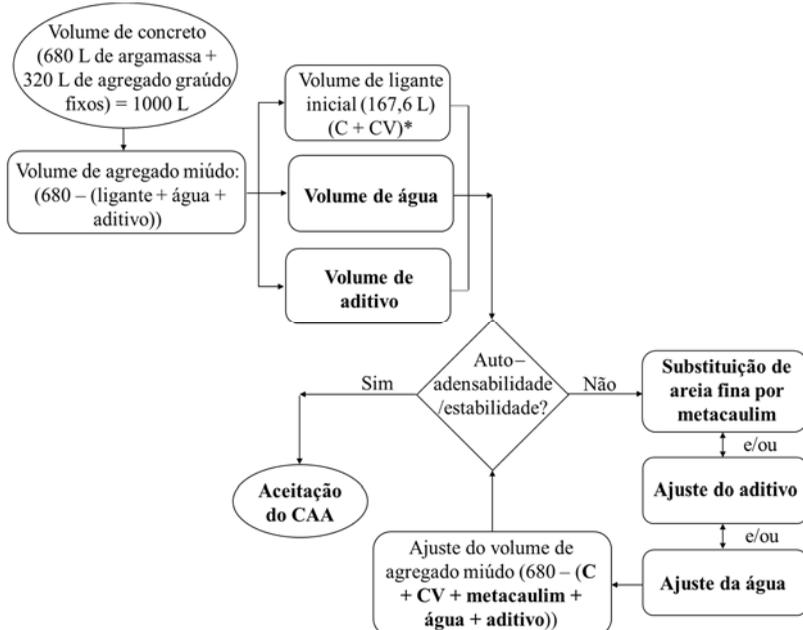
Os teores de metacaulim foram incorporados às misturas de forma que se utilizasse o mínimo possível deste material, desde que atendidos os parâmetros de fluidez, viscosidade e habilidade passante, sem sinais de segregação e/ou exsudação nos CAAs. Conforme mencionado anteriormente, utilizou-se os testes iniciais realizados na Etapa 1 como ponto de partida. Dessa forma, para ambas as cinzas (A e B), iniciaram-se as avaliações com teor volumétrico de 3% de metacaulim em substituição ao igual volume da areia fina. Devido à finura desta pozolana, os testes foram realizados para pequenos incrementos de metacaulim a cada avaliação, sendo que, na maioria das

situações, avaliaram-se misturas com acréscimos de 1% em 1%. Realizou-se, também, o refinamento dos teores em 0,5% para os CAAs que faziam uso da CVB, conforme relatado no Apêndice C.

Em suma, iniciou-se com a avaliação dos CAAs com 50% de cada cinza volante e, a partir da definição da composição destes, iniciava-se os estudos dos CAAs com 60% de cinza volante em substituição ao cimento. A cada teor de metacaulim avaliado, ajustava-se também o teor de aditivo superplastificante para que a mistura apresentasse fluidez dentro dos limites pré-definidos de  $(700 \pm 50)$  mm. Caso a mistura com determinado teor de metacaulim e aditivo apresentasse a fluidez desejada, além da ausência visual de segregação e exsudação, verificavam-se os demais parâmetros para o estado fresco do CAA, cujos ensaios estão descritos em 3.3.1.

Quanto à adequação do teor de aditivo superplastificante para cada CAA desenvolvido, caso necessário, volumes adicionais deste produto eram acrescentados diretamente na mistura dentro da betoneira. Em contrapartida, se o teor utilizado inicialmente fosse acima do ideal para aquela mistura, ocasionando, por exemplo, fluidez elevada com segregação do agregado graúdo e/ou exsudação excessiva, o CAA era descartado. Nestes casos, reiniciava-se o processo com uma dosagem inferior de aditivo. Após encontrar uma composição que apresentasse parâmetros de autoadensabilidade semelhantes ao esperado, reproduzia-se essa mistura e, caso necessário, novas correções eram realizadas. Por fim, desenvolvia-se o traço final ajustando-se os quantitativos de cada material para um volume de  $1000 \text{ L/m}^3$ , mantendo-se sempre constantes os volumes de agregado graúdo e argamassa, conforme ilustrado na Figura 17.

Figura 17: Esquema da composição volumétrica dos CAAs com 50% e 60% de CVA e CVB



\* C = cimento; CV = cinza volante.

Percebe-se que, diferentemente do que foi apresentado na Figura 16, para os CAAs com 40% de CVA e CVB, neste caso o volume de agregado miúdo final foi ajustado em função do volume de metacaulim e não de cinza volante em substituição da areia fina. Entretanto, do mesmo modo, volumes de água e aditivo não foram fixados devido aos ajustes necessários em cada situação, para melhoramento dos parâmetros de autoadensabilidade. Ressalta-se, ainda, que as alterações realizadas ocorreram em função do comportamento de cada CAA com cada cinza volante. Portanto, de certo modo, caminhos distintos foram seguidos para adequação dos CAAs com CVA e CVB, sendo estes detalhados no Apêndice C.

### 3.2.2.3 CAAs com CVC (moída)

A fim de complementar este estudo, optou-se por desenvolver CAAs com substituição de cimento por uma amostra de cinza volante moída (CVC). O objetivo neste caso era verificar o comportamento dos

CAAs, principalmente no estado fresco, em função da finura da cinza volante. Os CAAs executados com 40%, 50% e 60% de CVC, em substituição ao cimento, foram chamados de CAAs 40C, 50C e 60C, respectivamente.

Da mesma forma, como foi realizado com os CAAs 40A e 40B, na Etapa 1, iniciou-se a execução do CAA 40C apenas com a substituição do cimento por 40% da CVC, em volume. Neste caso, tomando-se como base os quantitativos de materiais utilizados no CAA REF 2. Diferentemente do que foi observado com a CVA e CVB, neste caso, a CVC proporcionou à mistura um melhor desempenho no estado fresco, ou seja, não se verificou a expressiva ocorrência de exsudação. Desse modo, realizou-se apenas a correção do teor de aditivo para atendimento dos parâmetros de autoadensabilidade.

Para a execução dos CAAs 50C e 60C, também foi necessária a realização de correções (Apêndice C). Estas adequações, para melhoramento das propriedades dos CAAs no estado fresco, foram realizadas utilizando-se a CVC em substituição da areia fina. Sendo assim, nos CAAs com CVC não se fez uso de metacaulim. Dessa maneira, o esquema da composição volumétrica destes CAAs segue o mesmo apresentado anteriormente na Figura 16. Além disso, os CAAs com a CVC também foram produzidos seguindo a metodologia utilizada na Etapa 2, ou seja, com a avaliação das misturas executadas diretamente na betoneira.

### 3.3 ENSAIOS DE CARACTERIZAÇÃO DOS CAAS

#### 3.3.1 Estado fresco

A caracterização no estado fresco dos CAAs foi realizada empregando-se os seguintes métodos:

- fluidez: ensaio de espalhamento (NBR 15823-2, 2010);
- viscosidade plástica aparente: ensaio de funil V (NBR 15823-5, 2010) e tempo de espalhamento  $T_{500}$  (NBR 15823-2, 2010);
- habilidade passante: caixa L, com três barras (NBR 15823-4, 2010);
- segregação e exsudação: avaliações visuais (ASTM C1611, 2014).

A verificação dos tempos de escoamento pelo funil V e espalhamento  $T_{500}$  foi realizada por meio da filmagem dos ensaios.

Conforme metodologia apresentada pela NBR 9833 (2009), encontrou-se para cada CAA a massa específica e teor de ar, sendo este último determinado conforme Equação 2.

$$\text{Teor de ar} = \left( 1 - \frac{1}{R/V_t} \right) * 100 \quad (2)$$

Onde:

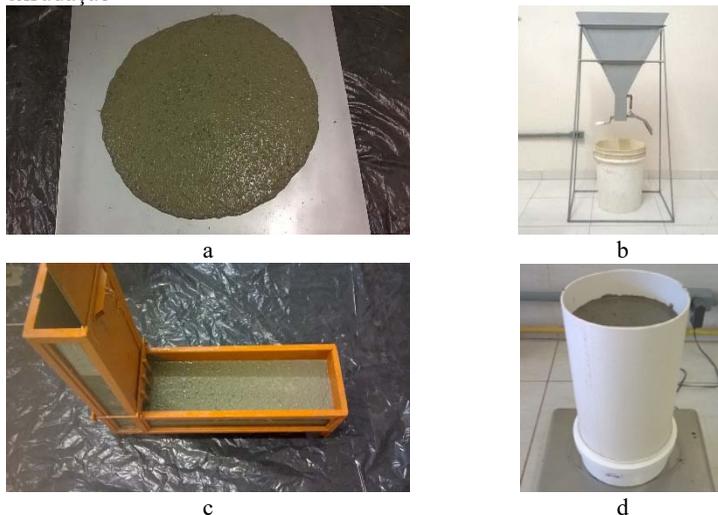
R = é o rendimento da mistura, correspondente pela relação entre a massa dos materiais da betonada e a massa específica do concreto, expresso em  $m^3$ ;

$V_t$  = volume total dos componentes da betonada, expresso em  $m^3$ .

O recipiente cilíndrico utilizado para verificar a massa específica do concreto possuía 200 mm diâmetro e 240 mm de altura, sendo este utilizado para concretos com agregados de dimensão máxima característica menor que 37,5 mm. Realizou-se, apenas nos CAAs da Etapa 2, um teste para verificação do volume total de água exsudada, utilizando-se como parâmetro a NBR 15558 (2008). O recipiente utilizado era de PVC (policloreto de polivinila) com diâmetro interno aproximado de 145 mm e altura interna livre para colocação do concreto de 250 mm.

A Figura 18, mostra os equipamentos utilizados para realização de alguns dos ensaios.

Figura 18: Equipamentos para caracterização dos CAAs no estado fresco: a) espalhamento; b) funil V; c) caixa L; d) recipiente para verificação da exsudação



Ressalta-se que a definição da verificação de segregação por meio de uma avaliação qualitativa ocorreu em função da quantidade de material necessário para realização do ensaio seguindo a NBR 15823-6 (2012). Sendo assim, pelo receio de que a quantidade de cinza volante não fosse suficiente para avaliação de todos os quesitos previamente estipulados, definiu-se por esta avaliação visual.

Ainda, seguindo a NBR 9833 (2009), pode-se encontrar o consumo final de cimento por  $m^3$  de concreto (Equação 3), e através deste, com o traço unitário de cada CAA, o consumo dos demais materiais.

$$C = \frac{m_c}{R} \quad (3)$$

Em que:

$C$  = é o consumo de cimento do concreto, expresso em  $kg/m^3$ ;

$m_c$  = é a massa de cimento da betonada, expressa em kg.

Após a verificação e aceitação do CAA no estado fresco, todo o volume de concreto utilizado nos ensaios era devolvido para a betoneira,

e misturado por mais 1 minuto, para posterior moldagem de corpos de prova.

### **3.3.2 Elevação adiabática de temperatura**

Um dos principais objetivos da aplicação de elevados teores de cinza volante no concreto é minimizar a liberação do calor de hidratação do cimento tendo em vista a redução do consumo deste ligante. Segundo Furnas (1997), a evolução da temperatura em estruturas massivas pode ser mensurada em ensaios com pasta ou argamassa, mas só é conhecida com exatidão quando se avaliam as curvas de elevação adiabática de temperatura do próprio concreto.

Dessa forma, executou-se o ensaio de elevação adiabática de temperatura de alguns dos CAAs produzidos neste estudo. A seleção dos CAAs foi realizada de forma que se pudesse avaliar os efeitos de cada teor de substituição do cimento (40%, 50% e 60%) por determinada cinza volante, assim como, para um mesmo teor, verificar a influência da utilização de diferentes amostras desta pozolana. Para tanto, definiu-se pela realização do ensaio nos CAAs REF 2, 40B, 50B, 60B, 60A e 60C. Considere-se também que cada traço foi ajustado para melhor atender as propriedades requeridas para um CAA no estado fresco. Além disso, destaca-se que o CAA 40B, executado na Etapa 1, foi reproduzido para execução do ensaio de calorimetria utilizando o cimento do lote 2.

Para desenvolvimento deste ensaio, os CAAs foram reproduzidos no Laboratório de Materiais de Construção Civil (LMCC) da UFSC.

A elevação da temperatura dos concretos foi avaliada com a utilização de um calorímetro adiabático desenvolvido no estudo de Junckes (2015) juntamente com o GTec. A estrutura do equipamento é formada por dois tanques metálicos, um externo denominado tanque de banho, com dimensões internas de 0,50 x 0,70 x 0,35 m, e outro tanque interno, para armazenamento do concreto, com dimensões internas de 0,20 x 0,20 x 0,20 m. Ambos os tanques possuem paredes revestidas por poliestireno expandido para melhor isolamento térmico (JUNCKES, 2015). O tanque de banho possuía uma resistência para aquecimento da água com potência de 1000 watts. O volume de CAA utilizado em cada ensaio foi de aproximadamente 4,1 L.

O equipamento foi programado para que a água do tanque de banho aquecesse na mesma velocidade do concreto, devido ao início das reações de hidratação do cimento, evitando assim trocas térmicas entre o concreto e o ambiente. Para tal, o sistema de controle de temperaturas

era composto por sensores do modelo Ds18b20 Arduino. Um destes sensores era posicionado dentro do volume do concreto e o outro, próximo ao centro do volume de água do tanque de banho. As leituras de temperatura com estes sensores eram realizadas a cada segundo. O programa de comando ao realizar as leituras, comparava as mesmas. À medida que o sistema verificava diferenças de temperatura entre o concreto e a água, da ordem de  $0,5^{\circ}\text{C}$ , ele enviava um comando para acionar a resistência visando ao aquecimento da água. Equilibradas as temperaturas da água e do concreto, o sistema emitia outro comando para desligamento da resistência. Para manter a temperatura da água homogênea dentro do tanque de banho, foi instalada uma bomba para circulação da água.

As leituras de temperatura do concreto para avaliação dos resultados foram realizadas a cada 5 minutos com utilização de sensores tipo K. Os dados foram registrados em um aquisitor de dados Datalogger Agilent 34970A. A Figura 19 ilustra o esquema de montagem do equipamento utilizado, enquanto a Figura 20 destaca a vista externa do tanque de banho e o sistema de aquisição de dados.

Figura 19: Esquema de montagem do calorímetro adiabático utilizado

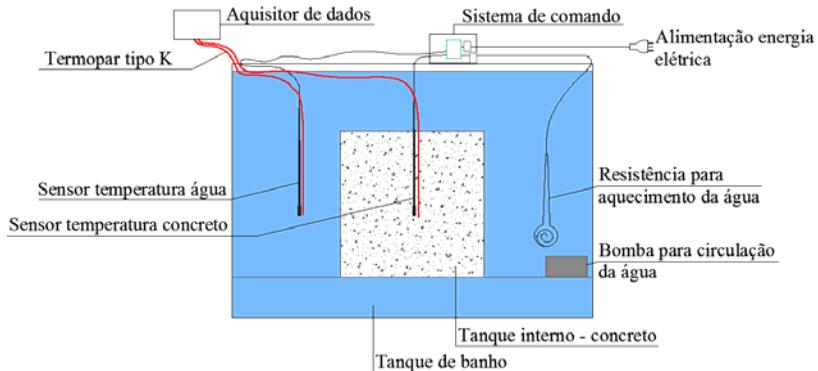


Figura 20: Equipamentos utilizados no ensaio de calorimetria: a) vista externa do tanque de banho e sistema de comando; b) aquisitor de dados Datalogger



Os concretos foram submetidos ao ensaio de elevação adiabática de temperatura por períodos variando de 68 h a 72 h, conforme a disponibilidade de horários para execução dos ensaios. Estes períodos de tempo foram suficientes para que as misturas atingissem praticamente a temperatura de pico com estabilização da curva de aquecimento dos CAAs.

### 3.3.3 Estado endurecido

No estado endurecido, as propriedades de resistência à compressão (NBR 5739, 2007) e módulo de elasticidade estático (NBR 8522, 2008) foram avaliadas. Para tais verificações, corpos de prova cilíndricos de 10 cm de diâmetro e 20 cm de altura foram moldados sem qualquer tipo de adensamento. Estes foram mantidos em cura inicial por um período de 24 h, em um ambiente climatizado. Posteriormente, foram colocados imersos em tanques de cura com a água (saturada com cal) mantida com temperatura de  $(23 \pm 2)^{\circ}\text{C}$ , onde permaneceram até o momento da realização dos ensaios.

A quantidade de corpos de prova de cada CAA foi estipulada em três unidades para cada idade pretendida de avaliação. Em função do tempo desta pesquisa, os corpos de prova foram ensaiados aos 28 e 91 dias, com exceção dos CAAs executados na Etapa 1, onde as avaliações ocorreram também para idade de 180 dias. No entanto, para fins de verificações futuras do desenvolvimento da resistência à compressão proveniente da reação pozolânica, moldaram-se corpos de prova para idades de 180 e 365 dias para todos os CAAs (Tabela 17).

Tabela 17: Quantidade de corpos de prova para avaliação no estado endurecido

Identificação CAA	28 dias	91 dias	180 dias	365 dias
Etapa 1	REF 1	3	3	3*

	40A	3	3	3	3*
	40B	3	3	3	3*
	REF 2	3	3	3*	3*
Etapa 2	50A	3	3	3*	3*
	60A	3	3	3*	3*
	50B	3	3	3*	3*
	60B	3	3	3*	3*
	40C	3	3	3*	3*
	50C	3	3	3*	3*
	60C	3	3	3*	3*

\* Avaliações posteriores ao término da dissertação.

Os ensaios de resistência à compressão e módulo de elasticidade foram executados em uma prensa hidráulica da marca EMIC, modelo PC200, de propriedade da Unoesc. Para cada idade de avaliação, inicialmente foi realizado o rompimento de um corpo de prova para verificação da resistência à compressão ( $f_c$ ) e, a partir deste valor, os outros dois foram inicialmente submetidos ao ensaio de módulo de elasticidade e, posteriormente, ao ensaio de resistência à compressão.

Para verificação do módulo de elasticidade, utilizou-se um compressômetro com bases independentes, o qual dispunha de dois relógios comparadores com resolução de 0,001 mm, fixados diametralmente opostos no equipamento (Figura 21).

Figura 21: Equipamento para ensaio de módulo de elasticidade



Os ensaios foram realizados seguindo a Metodologia A descrita na NBR 8522 (2008), com o cálculo do módulo de elasticidade, conforme Equação 4.

$$E_{ci} = \frac{(\sigma_b - 0,5)}{\varepsilon_b - \varepsilon_a} 10^{-3} \quad (4)$$

Em que:

$E_{ci}$  = módulo de elasticidade, expresso em GPa (gigapascals);

$\sigma_b$  = tensão maior em MPa (megapascals), que corresponde a  $0,3f_c$ ;

$0,5$  = tensão básica, expressa em MPa (megapascals);

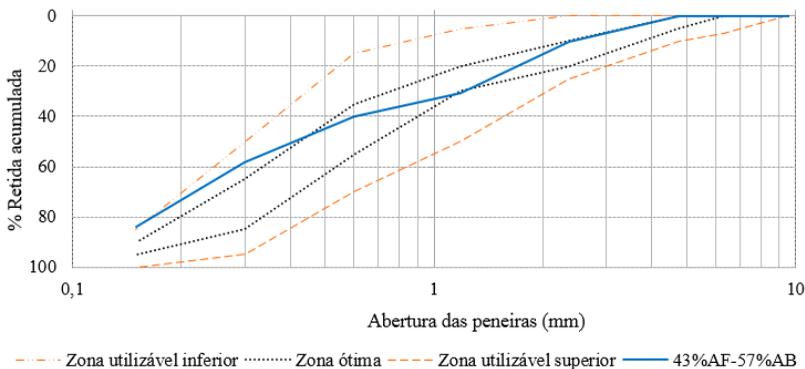
$\varepsilon_b$  = deformação específica média dos corpos de prova sob a tensão maior;

$\varepsilon_a$  = deformação específica média dos corpos de prova sob a tensão de  $0,5$  MPa.



adequada composição realizada com as duas areias, que produziu uma distribuição praticamente contínua dos grãos.

Figura 23: Curva granulométrica da composição de areia fina e areia de britagem



O módulo de finura do agregado miúdo com esta composição é de 2,23, ficando dentro da faixa recomendada por Repette (2011), o qual menciona um limite máximo de 2,40 para aplicação em CAA.

#### 4.1.2 Cinza volante

Na Tabela 18, estão apresentados valores de perda ao fogo e massa específica das cinzas volantes.

Tabela 18: Características da CVA, CVB e CVC

Característica	CVA	CVB	CVC
Perda ao fogo (%)	0,20	1,50	1,92
Massa específica (g/cm <sup>3</sup> )	1,98	2,14	2,36

Todas as cinzas utilizadas apresentaram valor inferior ao limite estipulado pela NBR 12653 (2015) de 6% para perda ao fogo. Entretanto, é notável que a CVB e CVC, ambas provenientes do Complexo Termelétrico Jorge Lacerda, apresentaram valores de perda ao fogo relativamente superiores comparadas à CVA, sendo esta última com procedência da Usina de Candiota no RS. As três amostras de cinza volante apresentaram também diferenças nos valores de massa específica, conforme apresentado na Tabela 18.

#### 4.1.2.1 Distribuição granulométrica – cinzas volantes e cimento

Para uma melhor comparação entre as cinzas volantes avaliadas e o cimento (utilizado na Etapa 2), a distribuição granulométrica de ambos os materiais está apresentada simultaneamente. Deste modo, a Figura 24 representa a porcentagem acumulada da distribuição granulométrica e a Figura 25 exhibe a distribuição do tamanho das partículas das cinzas volantes e do cimento.

Figura 24: Distribuição granulométrica das cinzas e do cimento – porcentagem passante acumulada

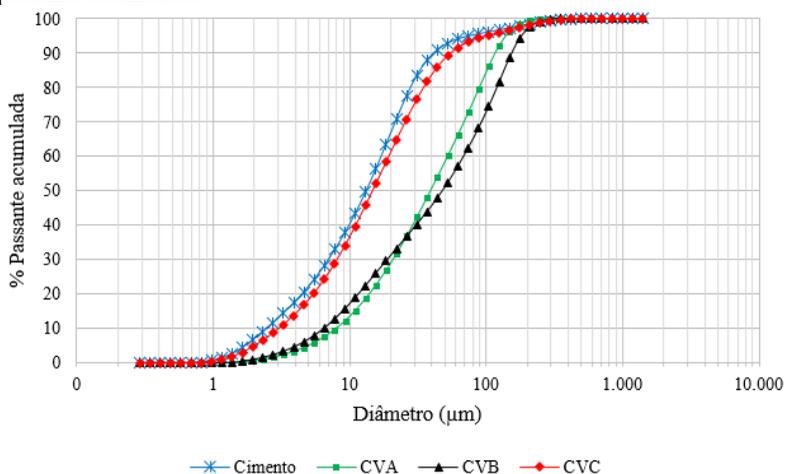
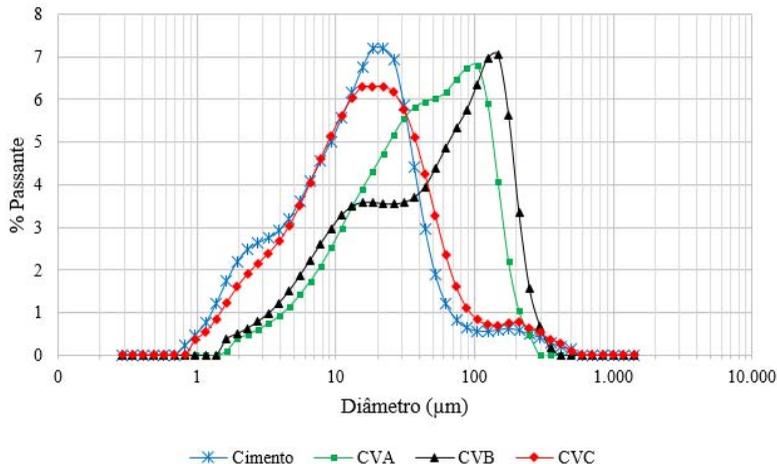


Figura 25: Distribuição do tamanho das partículas das cinzas volantes e do cimento



A partir dos resultados apresentados, é possível verificar que as três amostras de cinza volante apresentaram granulometria mais grossa que o cimento.

Destacando-se a CVA e CVB, que não passaram por processos de moagem, percebe-se que a maioria das partículas se encontra dentro de uma faixa aproximada de 1 µm a 150 µm (Figura 25). Entretanto, a CVB apresentou percentuais ligeiramente inferiores de partículas com diâmetros entre 15 µm e 75 µm, por exemplo, além de uma maior quantidade de partículas mais grossas, comparando-se com a CVA.

A CVC, em função da moagem, apresentou granulometria mais fina comparada com a CVA e CVB. Além disso, é a cinza que apresenta a menor diferença em relação a distribuição granulométrica do cimento.

Complementando as observações supracitadas, a Tabela 19 apresenta os diâmetros das partículas correspondentes à distribuição acumulada nos teores de 10%, 50% e 90%.

Tabela 19: Dados granulométricos para os percentuais  $D_{10}$ ,  $D_{50}$  e  $D_{90}$  das cinzas

Material	$D_{10}$	$D_{50}$	$D_{90}$
Cimento	2,46 µm	13,22 µm	41,26 µm
CVA	7,97 µm	39,05 µm	116,10 µm
CVB	6,49 µm	47,87 µm	153,80 µm
CVC	3,04 µm	14,72 µm	54,97 µm

Vale ressaltar, também, que enquanto o cimento utilizado (Etapa 2) possuía aproximadamente 95% das partículas inferiores a 75  $\mu\text{m}$ , a CVA, CVB e CVC apresentaram, nesta mesma ordem, percentuais aproximados de 73%, 63% e 93%. Com relação às partículas com diâmetro inferior a 45  $\mu\text{m}$ , os valores são da ordem de 91%, 54%, 48% e 86%, respectivamente, para cimento, CVA, CVB e CVC. A partir destas considerações, pode-se afirmar que a CVA é ligeiramente mais fina que a CVB.

#### 4.1.2.2 Índice de desempenho com cimento Portland

Os resultados do índice de desempenho com cimento Portland aos 28 dias estão apresentados na Tabela 20. Dos seis corpos de prova moldados, utilizou-se os quatro que apresentaram os maiores valores, atentando-se ao desvio relativo máximo de 6%, conforme recomenda a NBR 7215 (1997).

Tabela 20: Índice de desempenho com cimento Portland aos 28 dias das cinzas utilizadas

Identificação da mistura	Resistência à compressão média (MPa)	Desvio relativo máximo (%)	Índice de desempenho (%)
100% cimento	37,9	2,3	-
CVA	31,1	2,7	81,9
CVB	33,2	3,0	87,5
CVC	39,3	1,5	103,7

A CVB apresentou índice de desempenho ligeiramente superior, comparada à CVA. No entanto, em ambos os casos, os valores de atividade pozolânica ficaram abaixo do mínimo estipulado pela NBR 12653 (2015), a qual preconiza um limite mínimo de 90%.

Entretanto, vale ressaltar que a reação pozolânica aumenta com o tempo, e, portanto, estas cinzas podem melhorar seu desempenho em idades mais avançadas, conforme confirmado nos valores de resistência à compressão verificados nos CAAs, os quais estão apresentados posteriormente.

Além disso, como mencionado anteriormente, definiu-se pela utilização da CVA e CVB sem executar nenhum tipo de beneficiamento, como a moagem, por exemplo, justamente para avaliar a qualidade das cinzas da forma como foram coletadas nas concreteiras, ou seja, como eram aplicadas no concreto.

A CVC, moída, apresentou índice de desempenho com cimento Portland significativamente superior comparada as demais (Tabela 20), ficando inclusive acima do mínimo estipulado pela NBR 12653 (2015). A moagem da cinza volante permite a liberação de partículas das plerosferas, caso ocorram, além de influenciar na amplitude de diâmetros e na frequência com que ocorrem, aumentando a área específica da pozolana. Como as partículas mais finas atuam como pontos preferenciais para nucleação dos hidratos do cimento (HOPPE FILHO, 2008), este efeito pode ter ocorrido de forma mais eficaz com a utilização da CVC devido à sua maior finura.

Destaca-se ainda que, neste ensaio, a cura ocorre em 23°C e, portanto, não considera o acréscimo na atividade pozolânica das cinzas volantes quando submetidas a temperaturas mais elevadas, conforme citado por Hanehara *et al.* (2001), Narmluk e Nawa (2011) e Deschner *et al.* (2013). Entretanto, de acordo com Junckes (2015), o ensaio de índice de desempenho com cimento Portland apresenta resultados satisfatórios, sendo bastante utilizado em função do baixo custo e da facilidade na execução.

#### 4.1.2.3 *Chapèlle* modificado

O índice de atividade pozolânica *Chapèlle* modificado das cinzas volantes está mostrado na Tabela 21.

Tabela 21: Índice de atividade pozolânica *Chapèlle* modificado das cinzas utilizadas

Cinza volante	I <sub>Ca(OH)<sub>2</sub></sub> , expresso em mg de Ca(OH) <sub>2</sub> /g de pozolana		
	Determinação 1	Determinação 2	Média
CVA	401,0	382,0	391,5
CVB	410,9	370,2	390,6
CVC	514,6	522,5	518,5

De acordo com Raverdy *et al.* (1980<sup>14</sup> *apud* HOPPE FILHO, 2008), é considerado como material pozolânico aquele que apresentar consumo mínimo de 330 mg de CaO/g de pozolana. Corrigindo este valor por meio da relação molecular Ca(OH)<sub>2</sub>/CaO de 1,32, o consumo

<sup>14</sup> RAVERDY, M.; BRIVOT, F.; PAILLERE, A. M.; DRON, R. Appreciation of pozzolanic reactivity of minor components. 7<sup>th</sup> INTERNATIONAL CONGRESS ON THE CHEMISTRY OF CEMENT, Vol. 3, Paris, France, 1980.

mínimo é de 435,6 mg de  $\text{Ca(OH)}_2/\text{g}$  de pozolana. A partir da média dos resultados encontrados para CVA e CVB, de 391,5 e 390,6 mg de  $\text{Ca(OH)}_2/\text{g}$  de pozolana, respectivamente, ambas as cinzas ficaram abaixo do limite sugerido. De qualquer forma, apesar do resultado ter sido inferior ao recomendado, ficou comprovado que houve atividade pozolânica das cinzas A e B.

A média dos valores demonstra atividade pozolânica praticamente idêntica para CVA e CVB. Entretanto, se observados os valores individuais, percebe-se que o maior consumo individual de  $\text{Ca(OH)}_2$ , igual a 410,9 mg/g de pozolana, ocorreu para a CVB. Este comportamento pode estar relacionado com o fato de que a CVB apresentou maior quantidade de partículas inferiores a 15  $\mu\text{m}$ , comparada com a CVA, conforme apresentado na Figura 25.

A CVC novamente apresentou desempenho superior comparada às demais, com consumo médio de 518,5 mg de  $\text{Ca(OH)}_2/\text{g}$  de pozolana. Devido à reatividade da cinza volante ser diretamente influenciada pela área específica do material (NBR 15895, 2010), esta particularidade das amostras avaliadas possivelmente influenciou os valores verificados. Principalmente considerando que as cinzas B e C são provenientes de uma mesma fonte, porém com distribuições granulométricas distintas.

### 4.1.3 Metacaulim

Na Tabela 22, estão apresentados os valores de índice de desempenho com cimento Portland aos 28 dias e índice de atividade pozolânica *Chapelle* modificado para o metacaulim. Ressalta-se que o traço de referência utilizado na avaliação do desempenho com cimento é o mesmo apresentado anteriormente na Tabela 20.

Tabela 22: Índice de desempenho com cimento Portland aos 28 dias e *Chapelle* modificado do metacaulim

Desempenho com cimento	Resistência à compressão média (MPa)	Desvio relativo máximo (%)	Índice de desempenho (%)
	55,4	0,9	146,1
$I_{\text{Ca(OH)}_2}$ *	Determinação 1 953,6	Determinação 2 906,9	Média 930,3

\* Expresso em mg de  $\text{Ca(OH)}_2/\text{g}$  de pozolana.

Analisando-se o índice de desempenho do metacaulim com cimento Portland, percebe-se que o mesmo foi expressivamente maior se comparado ao verificado para as cinzas volantes, especialmente em

relação a CVA e CVB, conforme valores apresentados anteriormente na Tabela 20. O mesmo ocorreu no ensaio de *Chapèlle* modificado. Neste último, o resultado também foi superior ao mínimo recomendado pela NBR 15894-1 (2010), que é de 750 mg de  $\text{Ca}(\text{OH})_2$ /g de metacaulim. Estes resultados refletem, dentre outros aspectos, a elevada superfície específica deste material e sua alta reatividade.

## 4.2 CAAS NO ESTADO FRESCO

A seguir, estão apresentados os resultados verificados para o estado fresco dos CAAs produzidos nas Etapas 1 e 2. É de grande relevância ressaltar novamente que os CAAs com cinza volante foram ajustados para proporcionar parâmetros de autoadensabilidade aplicáveis e dentro de limites pré-definidos. Enfatiza-se, ainda, que o ajuste e/ou melhoramento das características no estado fresco dos CAAs ocorreu seguindo diferentes metodologias para a Etapa 1 e Etapa 2, conforme mencionado anteriormente.

Destaca-se, também, que os procedimentos utilizados para produção dos CAAs, em função do comportamento verificado para cada CAA e cada cinza volante, assim como os consumos de materiais utilizados na dosagem inicial dos CAAs, estão expostos no Apêndice C.

Desse modo, no item 4.2.1 deste capítulo, apresenta-se apenas a composição final de todos os CAAs desenvolvidos, assim como, no item 4.2.2 estão apresentados e comentados os resultados dos ensaios de caracterização dos CAAs no estado fresco.

### 4.2.1 Composição final dos CAAs

Conforme citado anteriormente, os consumos de materiais, em massa e volume, utilizados na dosagem inicial dos CAAs estão apresentados no Apêndice C. No entanto, os valores utilizados para compor os CAAs não consideram a incorporação de ar ocasionada no processo de mistura. Sendo assim, na Tabela 23 estão apresentados os consumos ajustados de materiais dos CAAs produzidos na Etapa 1 (CAA REF 1, 40A e 40B), encontrados a partir da verificação da massa específica real. Apresenta-se ainda seus respectivos traços unitários, volumes de materiais cimentícios e finos, assim como o teor de ar de cada CAA. Do mesmo modo, na Tabela 24, estão expostos os dados referentes aos CAAs executados na Etapa 2.

Tabela 23: Traço unitário, consumo de materiais por m<sup>3</sup> de concreto, massa específica e teor de ar para os CAAs da Etapa 1

Identificação	REF 1		40A		40B	
	Traço unitário	kg/m <sup>3</sup>	Traço unitário	kg/m <sup>3</sup>	Traço unitário	kg/m <sup>3</sup>
Cimento	1	519,2	0,704	308,9	0,688	308,7
Cinza volante	-	-	0,296	129,9	0,312	140,3
Consumo ligante inicial	1	519,2	1	438,8	1	449,0
Cinza volante complementar	-	-	0,062	27,1	0,066	29,6
Areia fina	0,694	360,6	0,733	321,7	0,723	324,7
Areia de britagem	0,933	484,6	1,095	480,4	1,080	484,8
Pedrisco	1,708	887,0	2,005	879,6	1,958	879,1
Água de mistura	0,377	195,7	0,442	193,9	0,425	190,9
Aditivo	0,0059	3,06	0,0074	3,25	0,0070	3,14
Água/cimento*	0,38		0,63		0,62	
Volume ligante (L/m <sup>3</sup> )	165		178		178	
Água/ligante (volume)**	1,19		1,10		1,08	
Volume total de finos (L/m <sup>3</sup> )	197		208		209	
Água/finos (volume)***	1,00		0,94		0,92	
Massa específica (kg/m <sup>3</sup> )	2450		2345		2361	
Teor de ar (%)	1,35		2,18		2,24	

\* água total (água mistura + voláteis do aditivo) / cimento;

\*\* água total / (cimento + cinza volante + cinza volante complementar);

\*\*\* água total / (ligante + pulverulento dos agregados).

Tabela 24: Traço unitário, consumo de materiais por m<sup>3</sup> de concreto, massa específica e teor de ar para os CAAs da Etapa 2

Identificação	REF 2		50A		60A		50B		60B	
	Traço unitário	kg/m <sup>3</sup>								
Cimento	1	519,1	0,613	255,4	0,514	204,9	0,595	257,6	0,494	205,3
Cinza volante	-	-	0,387	161,0	0,486	193,8	0,405	175,5	0,506	209,9
Consumo ligante inicial	1	519,1	1	416,4	1	398,8	1	433,1	1	415,1
Metacaulim	-	-	0,032	13,5	0,034	13,5	0,045	19,3	0,055	22,8
Areia fina	0,695	360,7	0,793	330,0	0,830	331,1	0,782	338,5	0,804	333,7
Areia de britagem	0,934	484,8	1,110	462,1	1,162	463,5	1,112	481,5	1,155	479,7
Pedrisco	1,708	886,8	2,096	872,6	2,195	875,3	2,032	880,1	2,112	876,8
Água	0,377	195,9	0,487	202,8	0,510	203,4	0,450	194,7	0,467	194,0
Aditivo	0,0049	2,54	0,0047	1,94	0,0049	1,95	0,0045	1,94	0,0047	1,95
Água/cimento*	0,38		0,80		1,00		0,76		0,95	
Volume ligante (L/m <sup>3</sup> )	165		168		168		172		172	
Água/ligante (volume)**	1,19		1,21		1,21		1,14		1,13	
Volume de finos (L/m <sup>3</sup> )	196		198		198		202		203	
Água/finos (volume)***	1,00		1,03		1,03		0,97		0,96	
Massa específica (kg/m <sup>3</sup> )	2450		2299		2287		2349		2324	
Teor de ar (%)	1,38		2,95		2,66		2,12		2,49	

\* água total (água mistura + voláteis do aditivo) / cimento;

\*\* água total / (cimento + cinza volante + metacaulim);

\*\*\* água total / (ligante + pulverulento dos agregados).

... continua

... continuação da Tabela 23

Identificação	40C		50C		60C	
	Traço unitário	kg/m <sup>3</sup>	Traço unitário	kg/m <sup>3</sup>	Traço unitário	kg/m <sup>3</sup>
Cimento	0,666	307,1	0,571	258,7	0,470	205,3
Cinza volante	0,334	153,9	0,429	194,5	0,530	231,5
Consumo ligante inicial	1,0	460,9	1	453,2	1	436,8
Cinza volante complementar	-	-	0,054	24,4	0,074	32,3
Areia fina	0,772	356,0	0,734	332,9	0,736	321,3
Areia de britagem	1,038	478,4	1,067	483,6	1,098	479,8
Pedrisco	1,897	874,4	1,951	884,1	2,008	876,9
Água	0,420	193,5	0,431	195,6	0,444	194,0
Aditivo	0,0039	1,80	0,0045	2,04	0,0044	1,91
Água/cimento*	0,63		0,76		0,95	
Volume ligante (L/m <sup>3</sup> )	163		175		177	
Água/ligante (volume)**	1,19		1,12		1,10	
Volume de finos (L/m <sup>3</sup> )	194		206		208	
Água/finos (volume)***	1,00		0,95		0,94	
Massa específica (kg/m <sup>3</sup> )	2365		2376		2343	
Teor de ar (%)	2,76		1,68		2,47	

\* água total (água mistura + voláteis do aditivo) / cimento;

\*\* água total / (cimento + cinza volante + cinza volante complementar);

\*\*\* água total / (ligante + pulverulento dos agregados).

Quanto aos volumes de ligante apresentados na Tabela 23, nota-se que, nos CAAs 40A e 40B os valores excederam o CAA REF 1. No CAA 40A, o volume de CVA da mistura corresponde a 44,6% do volume total de ligante, sendo este percentual praticamente o mesmo de CVB presente no CAA 40B, que foi de 44,7%. Na Etapa 2, todos os CAAs com 50% e 60% de cinza volante substituindo o cimento também foram concluídos com volumes de ligante superiores comparados ao CAA REF 2, conforme exposto na Tabela 24. Esta característica reflete as correções realizadas em cada traço para melhoramento das propriedades dos CAAs no estado fresco.

Os CAAs com 50% e 60% de CVA substituindo o cimento exibiram 3,1% de metacaulim em relação ao volume total de ligante. Com a utilização da CVB, os CAAs 50B e 60B apresentaram, respectivamente, 4,4% e 5,2% de metacaulim, também referentes ao volume total de ligante em cada CAA. Do consumo total de ligante dos CAAs 50C e 60C, 53,0% e 63,1% correspondem ao volume de CVC, respectivamente. Ressaltando-se que, nos CAAs com CVC não se fez uso de metacaulim, assim como, no CAA 40C realizou-se apenas a substituição de 40% do volume de cimento pelo mesmo volume de CVC. Em todos os CAAs que fizeram uso de cinza volante, considerou-se o volume das mesmas integralmente nos volumes de ligante e de finos apresentados. Ou seja, não houve classificação de partículas com diâmetros inferiores a 75  $\mu\text{m}$ , por exemplo.

Em função do maior volume de ligante nos CAAs com cinza volante as relações água/ligante (em volume) foram reduzidas comparadas aos traços de referência, com exceção dos CAAs 40C, 50A e 60A. Em contrapartida, a relação a/c passou de 0,38, dos CAA REF 1 e REF 2, para valores significativamente maiores, quanto mais elevado o teor de substituição do cimento. Todos os CAAs produzidos apresentaram teor de ar aprisionado inferior a 3%, assim como, os CAAs com cinza volante apresentaram os maiores valores comparados aos CAAs executados apenas com cimento (REF 1 e REF 2).

#### **4.2.2 Ensaios de caracterização**

Os resultados dos ensaios para verificação da fluidez, viscosidade plástica aparente e habilidade passante dos CAAs estão ilustrados na Tabela 25, onde também se apresentam os valores de avaliação visual de segregação e exsudação conforme ASTM C1611 (2014). Para os CAAs que compõem a Etapa 2, apresentam-se ainda os

valores de exsudação encontrados, conforme preconiza a NBR 15558 (2008).

Tabela 25: Resultados dos ensaios de caracterização dos CAAs no estado fresco

CAA		Espalhamento (mm)	T <sub>500</sub> (s)	Funil V (s)	Caixa L (H <sub>2</sub> /H <sub>1</sub> )	ASTM C1611	Exsudação (L/m <sup>2</sup> )
Etapa 1	REF 1	710	6	19	0,88	0	*
	40A	685	5	14	0,92	1	*
	40B	700	3	9	0,89	1	*
Etapa 2	REF 2	700	6	18	0,86	0	0,02
	50A	715	3	9	0,98	0	-
	60A	695	3	9	0,98	0	0,03
	50B	680	5	12	0,92	0	-
	60B	710	3	8	0,99	0	-
	40C	698	2	10	0,89	0	-
	50C	675	3	13	0,96	0	-
	60C	695	3	14	0,90	0	-

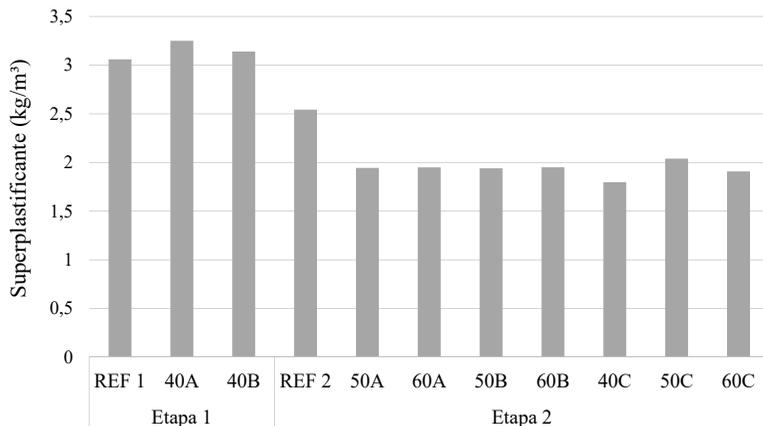
\* Ensaio não realizado; (-) CAA sem exsudação.

As observações quanto aos resultados encontrados nos ensaios de caracterização no estado fresco estão abordadas a seguir.

#### 4.2.2.1 Fluidez

Todos os concretos produzidos atenderam ao espalhamento previamente definido de  $(700 \pm 50)$  mm, conforme apresentado na Tabela 25. O consumo de aditivo superplastificante utilizado em cada CAA, para alcançar a fluidez desejada, está ilustrado na Figura 26.

Figura 26: Valores referentes ao consumo de aditivo superplastificante dos CAAs



Um fato relevante a ser observado refere-se ao aumento no consumo de aditivo para os CAAs 40A e 40B, executados na Etapa 1, em relação ao utilizado no CAA REF 1, para se obter valores de espalhamento semelhantes. Esta característica foi oposta ao verificado por Bouzoubaâ e Lachemi (2001), Nehdi, Pardhan e Koshowski (2004) e Güneysi *et al.* (2015), que desenvolveram CAAs com substituição de cimento por cinza volante em massa, e Liu (2010), para substituições em volume. Uma hipótese que poderia ser considerada para o aumento do consumo de aditivo nos CAAs 40A e 40B, é o teor de carbono presente nas cinzas (ATIS, 2005; MEHTA; MONTEIRO, 2014). No entanto, como o valor de perda ao fogo da CVB é maior que o da CVA, neste caso, os resultados encontrados parecem não ter relação direta com esta propriedade, visto que o CAA 40A demandou maior teor de aditivo.

Além disso, se observado o CAA 40C, executado na Etapa 2, percebe-se que este apresentou consumo de aditivo superplastificante relativamente inferior aos demais CAAs com 40% de cinza volante em substituição ao cimento. No CAA 40C não houve aumento no volume de finos em relação ao CAA REF 2, além do fato de a CVC apresentar valor de perda ao fogo de 1,92%, ou seja, superior às demais. A partir desta abordagem, poderia, em um primeiro momento, vincular-se o aumento no consumo de aditivo dos CAAs 40A e 40B ao acréscimo no volume finos destas misturas. Conforme apresentado anteriormente, o volume de finos total dos CAAs com 40% de cada cinza volante foi de 208, 209 e 194 L/m<sup>3</sup> para o CAA 40A, 40B e 40C, respectivamente.

Contudo, esta afirmação torna-se questionável ao comparar os CAAs 40A e 40B com aqueles executados na Etapa 2, conforme discussão a seguir.

Em relação aos CAAs produzidos na Etapa 2 com 50% e 60% de CVA e CVB em substituição ao cimento, em ambos os casos, o consumo de aditivo superplastificante foi inferior em aproximadamente 23% comparado ao CAA REF 2. Enfatiza-se, no entanto, que nos CAAs 50A e 60A foi necessário o aumento do volume de água total em 10 L/m<sup>3</sup>, comparando-se ao CAA REF 2, para que os mesmos apresentassem fluidez e viscosidade satisfatórias. Entretanto, mesmo assim, a utilização do metacaulim favoreceu o aumento da fluidez, especialmente nos CAAs com utilização da CVB. Estima-se que a distribuição granulométrica da CVB, conforme apresentado anteriormente, tenha acarretado a falta de partículas de maior finura para proporcionar um melhor empacotamento granulométrico nestas misturas, sendo este último parâmetro ajustado com o metacaulim, melhorando a fluidez dos CAAs com a CVB sem a necessidade de acréscimos no volume de água. Segundo Mehta e Monteiro (2014), em concretos com tendência a exsudar ou segregar, a incorporação de partículas com tamanhos muito finos melhora a trabalhabilidade devido a redução do tamanho dos vazios. Deve-se considerar ainda que a substituição de areia fina por metacaulim aumentou o volume de pasta destes CAAs. Esta condição, segundo Silva (2008), resulta no menor atrito interno entre os grãos dos agregados e conseqüentemente no aumento da fluidez.

Com relação a utilização da CVC no CAA, observa-se na Figura 26 que, para os três níveis de substituição de cimento avaliados o consumo de aditivo foi inferior ao CAA REF 2 e semelhante aos CAAs com 50% e 60% de CVA e CVB. Esta situação remete a influência das características dos materiais finos utilizados no lugar do cimento. A CVC foi a que apresentou a distribuição granulométrica mais próxima comparada à do cimento. Isso possibilitou a execução do CAA 40C sem correções na quantidade e tipo de materiais finos empregados na mistura, e, simultaneamente, permitiu a redução do consumo de aditivo. Mesmo a CVC sendo moída, acredita-se que parte das partículas ainda apresentaram superfícies menos angulosas e ásperas que as do cimento, favorecendo a fluidez. O mesmo ocorreu nos CAAs 50C e 60C onde, apesar da incorporação de CVC em substituição da areia fina, foi necessária a redução do aditivo superplastificante para atender a fluidez desejada.

Em suma, nota-se que, na Etapa 1, os CAAs com cinza volante demandaram maior quantidade de aditivo em relação ao CAA REF 1, diferente do que ocorreu na Etapa 2. Considerando que na Etapa 2 os CAAs com CVA e CVB foram corrigidos com metacaulim e os CAAs com CVC (moída) foram adequados com a própria cinza volante, diferentes possibilidades podem ser levantadas - uma vinculada ao excesso de materiais finos nos CAAs com cinza volante desenvolvidos na Etapa 1, conforme mencionado anteriormente. Entretanto, o CAA 60C, por exemplo, também apresentou 208 L/m<sup>3</sup> de materiais finos, sendo este volume similar ao verificado nos CAAs 40A e 40B. A partir desta observação, a outra hipótese considerada refere-se a falta de partículas de maior finura devido a substituição do cimento pela CVA e CVB. Na Tabela 26, encontra-se o volume aproximado de materiais com partículas menores de 75 µm resultante em cada CAA. Destaca-se que, nos dados apresentados, considerou-se o cimento integralmente. Além disso, nos CAAs 40A e 40B, apenas para fins de comparação, utilizaram-se os dados do cimento do segundo lote.

Tabela 26: Volume de finos dos CAAs desconsiderando as partículas das cinzas volantes maiores de 75 µm

	REF 2	40A	50A	60A	40B	50B	60B	40C	50C	60C
L/m <sup>3</sup>	196	187	176	172	179	172	167	189	200	200

Se observados os CAAs 40A e 40B, percebe-se que os mesmos apresentaram, respectivamente, volumes de finos (desconsiderando as partículas das cinzas volantes maiores de 75 µm) inferiores em aproximadamente 9 e 17 L/m<sup>3</sup> comparados ao CAA REF 2. Além disso, os CAAs com a CVC foram os que apresentaram os volumes mais semelhantes ao CAA feito apenas com cimento. Ressalta-se, no entanto, que o volume total de finos dos CAAs 40A, 40B, 50C e 60C (Tabelas 23 e 24), considerando as cinzas integralmente, foram semelhantes e superiores em relação ao CAA REF 2, sendo estes acréscimos variando de 10 a 13 L/m<sup>3</sup>. Estas observações justificariam a possibilidade de que a falta de partículas de maior finura influenciou negativamente na fluidez dos CAAs 40A e 40B, demandando maior teor de aditivo.

Entretanto, quando avaliados os CAAs com 50% e 60% de CVA e CVB, estes foram os que apresentaram os menores volumes de partículas finas, desconsiderando aquelas maiores de 75 µm das cinzas volantes. Nestes casos, o menor volume destes finos ressalta a expressiva influência do metacaulim, que apresenta elevada superfície específica, na melhoria da fluidez destes CAAs. Isso sugere que o efeito

ocasionado pela falta de partículas muito finas pode ser superior àquele proporcionado pela presença de partículas maiores e normalmente mais esféricas das cinzas volantes. O efeito verificado nos CAAs 50A e 60A e, especialmente nos CAAs 50B e 60B, também foi mencionado por Şahmaran, Christianto e Yaman (2006). Estes, por sua vez, verificaram o aumento na fluidez de argamassas autoadensáveis com utilização de cinza volante (partículas mais grossas) em conjunto com partículas extremamente finas de filer calcário. A influência positiva do efeito proporcionado pelas partículas esféricas da cinza volante atuando na redução do atrito na interface agregado-pasta, pelo efeito “rolamento”, foi abordada. Além disso, a finura do filer como um parâmetro relevante para melhorar a trabalhabilidade das misturas autoadensáveis também foi destacada.

Ainda, comparando-se os CAAs com CVA e CVB, nota-se que o volume de partículas inferiores a 75  $\mu\text{m}$  é semelhante em cada teor de substituição do cimento, 50A e 50B por exemplo, com diferenças inferiores a 5%. Este fato também reforça a suspeita de que a morfologia da CVA influenciou na menor fluidez verificada nos CAAs produzidos com ela.

Portanto, estima-se que a combinação de características como a finura e morfologia dos finos utilizados neste estudo, especialmente das cinzas volantes, tenham influenciado de forma relevante no comportamento dos CAAs. Todavia, além dos pontos abordados quanto ao aumento no consumo de aditivo superplastificante dos CAAs 40A e 40B, há de se levar em conta, também, a possível interferência do lote do cimento e da metodologia de dosagem utilizada na Etapa 1.

#### 4.2.2.2 Viscosidade plástica aparente

Destaca-se novamente que as avaliações foram feitas indiretamente pelos ensaios de funil V e tempo de espalhamento  $T_{500}$ . Além disso, buscava-se desenvolver CAAs preferencialmente com tempos de escoamento pelo funil V na faixa de 9 s a 15 s. Avaliando-se individualmente os concretos executados na Etapa 1 (Tabela 25), percebe-se que o CAA REF 1 apresentou viscosidade elevada tanto pelo tempo de espalhamento  $T_{500}$  como pelo tempo de escoamento pelo funil V, ficando acima do limite estipulado previamente. No entanto, definiu-se por manter este traço, pois a viscosidade elevada, possivelmente ocasionada pelo elevado consumo de cimento, poderia ser benéfica quando utilizada a cinza volante em sua substituição. De fato, posteriormente confirmou-se que ambos os concretos com cinza volante

realizados na Etapa 1 apresentaram viscosidade inferior à do CAA REF 1.

O CAA REF 2 também apresentou valor de escoamento pelo funil V acima do limite definido previamente e similar ao encontrado no CAA REF 1, conforme mostrado na Tabela 25. Na Etapa 2, na maioria das situações avaliadas, as cinzas utilizadas também favoreceram na redução da viscosidade dos CAAs, excetuando-se os CAAs com a CVA, onde o acréscimo de água certamente influenciou nesta redução.

Liu (2010) e Sua-iam e Makul (2014) também constataram redução da viscosidade através do ensaio de funil V, para CAAs com 40% e 60% de cinza volante (em volume) substituindo o cimento, mesmo com redução da água em relação ao CAA de referência. Esta redução na viscosidade, segundo Ng e Justnes (2016), pode ser proveniente do formato normalmente esférico das cinzas volantes, que facilita o escoamento da mistura. Além disso, de acordo com Mehta e Monteiro (2014), as partículas de cimento, por serem finamente moídas, apresentam forças de atração entre suas arestas, cantos e superfícies. Esta característica do cimento, especialmente no CAA REF 1 e REF 2, pode ter aumentado a quantidade de água adsorvida em torno de suas partículas, influenciando diretamente na maior viscosidade da mistura. Em contrapartida, pressupõe-se que as cinzas apresentem forças superficiais menos expressivas em comparação às do cimento, ocasionando a redução na retenção de água em torno de suas partículas e aumentando a quantidade de água livre. Consequentemente, a viscosidade dos CAAs com cinza volante foi diminuída.

Ênfase é dada aos CAAs com CVB. O CAA 40B apresentou valores de viscosidade consideravelmente inferiores aos demais CAAs pertencentes a Etapa 1, mesmo com redução do volume de água na mistura. Os CAAs com a CVB executados na Etapa 2 também apresentaram viscosidade inferior ao CAA REF 2, mesmo sem aumentos no volume de água, com presença de metacaulim nas misturas e com redução no volume de aditivo superplastificante. Nestes casos, acredita-se que a granulometria mais grossa da CVB, comparada com a do cimento e com as das outras cinzas, tenha contribuído para a redução da viscosidade. Há ainda, a possibilidade da CVB ter maior quantidade de partículas com superfícies mais lisas e/ou esféricas comparada com as demais. Estas características são relacionadas na literatura por auxiliarem na redução da viscosidade dos CAAs devido ao menor atrito entre as partículas. A utilização de metacaulim combinado com a CVB nos CAAs 50B e 60B não acarretou aumentos significativos na viscosidade destes CAAs, indicando que o efeito da cinza volante

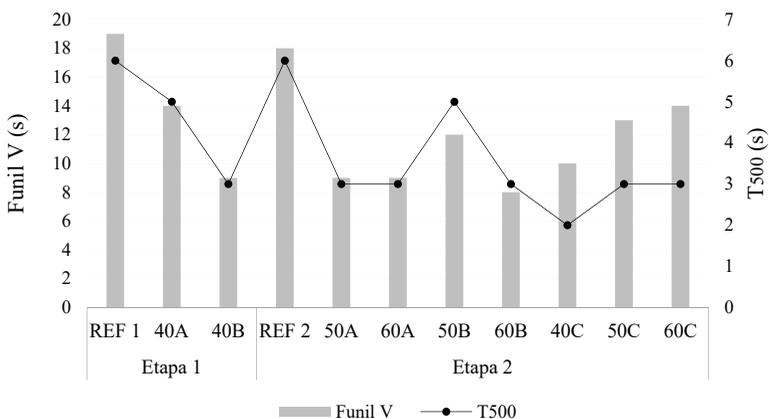
prevaleceu. Güneysi e Gesoğlu (2008) também verificaram que misturas ternárias de cimento, cinza volante e teores moderados de metacaulim proporcionaram argamassas autoadensáveis menos viscosas em relação àquela desenvolvida apenas com cimento.

Se levadas em conta as observações mencionadas para a CVB, pode-se considerar novamente que o desempenho dos CAAs com a CVA, quanto a fluidez e viscosidade, está realmente atrelado com a morfologia desta cinza.

Em relação aos CAAs executados com a CVC, os CAAs 50C e 60C apresentaram os valores mais elevados de viscosidade, avaliados pelo ensaio do funil V, comparados aos demais CAAs com cinza volante pertencentes a Etapa 2. Este fato também pode estar relacionado com uma possível maior angulosidade da CVC, em função da moagem das partículas, aumentando a resistência ao escoamento em fluxo confinado. Além disso, o volume de finos total destes CAAs foi superior em relação aos outros CAAs elaborados nesta Etapa. Há de se considerar, ainda, que a própria granulometria da CVC, por ser mais fina que as demais, pode ter contribuído para a maior viscosidade.

Quanto aos valores de viscosidade dos CAAs, avaliados através do tempo de espalhamento  $T_{500}$ , a Figura 27 ilustra os valores verificados comparando-os com aqueles encontrados no ensaio do funil V.

Figura 27: Valores de viscosidade dos CAAs verificados através dos ensaios de Funil V e  $T_{500}$



Percebe-se que houve um comportamento semelhante quanto à viscosidade em fluxo livre e confinado dos CAAs de referência, da Etapa 1 e 2, com os CAAs utilizando a CVA e CVB. Nestas situações verifica-se que os CAAs que apresentaram os maiores tempos de espalhamento  $T_{500}$  também exibiram os maiores tempos de escoamento pelo funil V. Em contrapartida, os CAAs 40C, 50C e 60C, que tiveram tempos de escoamento de 10 s, 13 s e 14 s, respectivamente, apresentaram tempos de espalhamento  $T_{500}$  relativamente baixos de 2 s e 3 s. Estes tempos de espalhamento dos CAAs com a CVC foram semelhantes aos encontrados nos CAAs com a CVA e CVB onde a viscosidade avaliada pelo funil V ficou abaixo de 10 s. Estima-se que a menor coesão verificada nos CAAs executados com a CVC em substituição ao cimento, conforme mencionado anteriormente, possa ter contribuído para o rápido espalhamento destes CAAs (MADANDOUST; MOUSAVI, 2012). Outra possibilidade a ser considerada é que a CVC tenha causado uma maior lubrificação nestas misturas, sendo este efeito proporcionado pela presença de partículas mais finas (SFIKAS; BADOGIANNIS; TREZOS, 2014).

#### 4.2.2.3 Habilidade passante

Quanto a habilidade passante dos CAAs, avaliados através do ensaio da caixa L, todos apresentaram relação  $H_2/H_1$  maior que 0,80, atendendo as especificações da NBR 15823-1 (2010). Verifica-se na Tabela 25, que os valores de  $H_2/H_1$  que mais se aproximaram de 1 foram dos CAAs 50A, 60A e 60B, ou seja, os CAAs com menor resistência em fluxo confinado.

#### 4.2.2.4 Segregação e exsudação

Através de avaliações visuais no ensaio de espalhamento, seguindo as recomendações da ASTM C1611 (2014), classificou-se os CAAs quanto à sua estabilidade (Tabela 25). Dos CAAs que compõem a Etapa 1, o CAA REF 1 foi classificado como altamente estável (valor 0), pois não apresentou sinais de segregação, como acúmulo de agregado no centro da mistura ou separação da argamassa do agregado graúdo, assim como, não apresentou brilho de água na superfície da mistura. Os CAAs 40A e 40B foram classificados em estáveis (valor 1), visto que, também não apresentaram indicações de segregação, no entanto, verificou-se brilho de água sobre a massa do concreto, caracterizado como uma exsudação leve. A leve exsudação verificada,

mesmo com as correções realizadas com acréscimos de cinza volante nas misturas, está atrelada com às propriedades das cinzas utilizadas. Conforme mencionado anteriormente, estima-se que as superfícies das partículas das cinzas possuem menor capacidade de adsorção de água, devido às forças de atração, em comparação com as partículas do cimento. Além disso, como efeito secundário, a cinza volante normalmente apresenta partículas com superfícies mais lisas comparadas às do cimento e, conseqüentemente, retém menos água. Outro fator relevante é a distribuição granulométrica da CVA e CVB - ambas apresentaram granulometrias significativamente mais grossas comparadas ao cimento e, conseqüentemente superfície específica inferior ao mesmo. Todos os CAAs da Etapa 2 também foram classificados por este método como altamente estáveis (valor 0), conforme exposto na Tabela 25. Estas classificações são semelhantes ao apresentado na pesquisa de Celik *et al.* (2015).

Realizou-se também o ensaio especificado pela NBR 15558 (2008), a fim de complementar a avaliação da quantidade de água exsudada nos CAAs realizados na Etapa 2. Apenas para o CAA REF 2 e 60A foi possível realizar a coleta de água exsudada, sendo que os valores encontrados também estão expostos na Tabela 25. Como parâmetro de comparação para estes resultados, cita-se o estudo de Melo (2005), a qual encontrou valores entre 0,019 e 0,15 L/m<sup>2</sup>. Nessa situação os valores foram considerados baixos e verificados em CAAs com filer calcário. Pode-se mencionar ainda o estudo de Bouzoubaâ e Lachemi (2001), conforme apresentado em 2.4.1, onde os resultados para CAAs com cinza volante variaram entre 1,29 e 0,25 L/m<sup>2</sup>. Sendo assim, os valores medidos no CAA REF 2 e 60A também podem ser caracterizados como baixos.

Destaca-se o desempenho positivo da utilização do metacaulim nos CAAs com 50% e 60% de CVA e CVB. De forma geral, pode-se frisar os excelentes resultados na correção da exsudação, a contribuição deste material na redução do volume de aditivo superplastificante e a melhoria da coesão das misturas. Estes aspectos concordam com o exposto por Male (1989<sup>15</sup> *apud* DAL MOLIN, 2011) sobre a influência de pequenas partículas como bloqueadoras de poros aumentando o contato sólido-sólido, elevando a coesão e reduzindo a exsudação do concreto. Certamente, a elevada superfície específica do metacaulim,

---

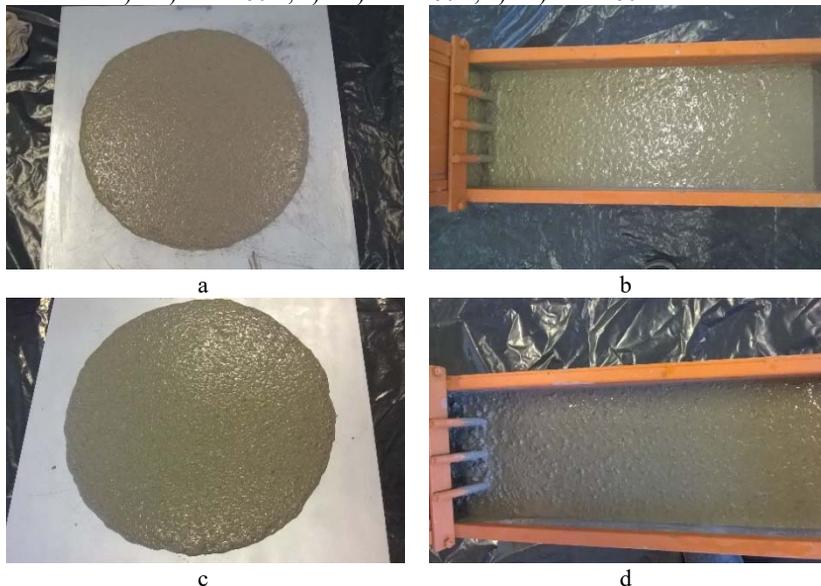
<sup>15</sup> MALE, Properties of microsilica concrete: An overview of microsilica concrete in the UK. Concrete, London, v. 23, n. 8, p. 31-34, sep. 1989.

por adsorver rapidamente a água (SNELSON; WILD; O'FARRELL, 2008), contribuiu largamente nestes resultados.

Ainda, de acordo com Mehta e Monteiro (2014), quanto mais fina for a adição mineral, menor é a quantidade necessária para aumentar a coesão e a trabalhabilidade da mistura no estado fresco. Esta última colocação concorda com os resultados verificados neste trabalho, onde o volume de metacaulim utilizado nos CAAs com 50% e 60% de CVA e CVB foi menor que o volume de cinza incorporado nos CAAs 40A e 40B para correção da exsudação. Além disso, ressalta-se novamente a questão da qualidade das cinzas empregadas nos CAAs, visto que a CVC foi a única que permitiu a execução dos CAAs com substituições do cimento em teores volumétricos de 50% e 60% sem a incorporação de metacaulim.

Na execução do ensaio da caixa L, fez-se uma avaliação complementar quanto à segregação dos CAAs. Em todos os casos o agregado graúdo foi conduzido por toda a área de abrangência dos concretos, sem acúmulos excessivos ou separação da argamassa próximo as barras de aço por onde escoam os CAAs. A visualização do comportamento de alguns dos CAAs nos ensaios de espalhamento e caixa L pode ser realizada na Figura 28.

Figura 28: Verificação de segregação e exsudação nos ensaios de espalhamento e caixa L: a) e b) CAA 60A; c) e d) CAA 60B; e) e f) CAA 60C



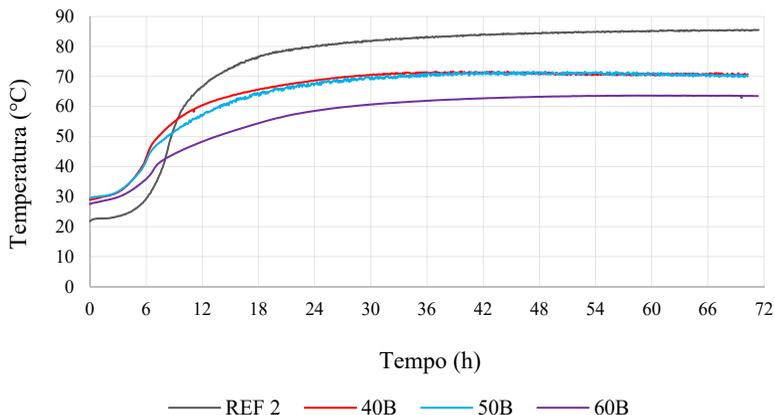


### 4.3 ELEVAÇÃO ADIABÁTICA DE TEMPERATURA

Em função da quantidade elevada de cimento do CAA REF 2, reduziu-se a temperatura inicial deste CAA por meio da substituição parcial da água de mistura por gelo. Esta medida foi necessária pois, ao realizar o ensaio com os materiais em temperatura ambiente, o CAA REF 2 alcançou em 23 h uma temperatura de 95°C, inviabilizando a continuação do experimento para não se danificar o equipamento utilizado. Deste modo, definiu-se pela redução da temperatura inicial e, conseqüentemente, da temperatura máxima alcançada pelo CAA REF 2. Todavia, acredita-se que a utilização de gelo não minimizou o desenvolvimento do calor de hidratação neste CAA, visto que, os resultados verificados de elevação adiabática de temperatura ( $\Delta T$ ) das misturas com e sem utilização de gelo, mesmo que em períodos de tempos distintos, foram semelhantes. Em todos os outros CAAs, a mistura foi realizada com os materiais em temperatura ambiente, a fim de evitar possíveis retardos no processo de hidratação dos aglomerantes.

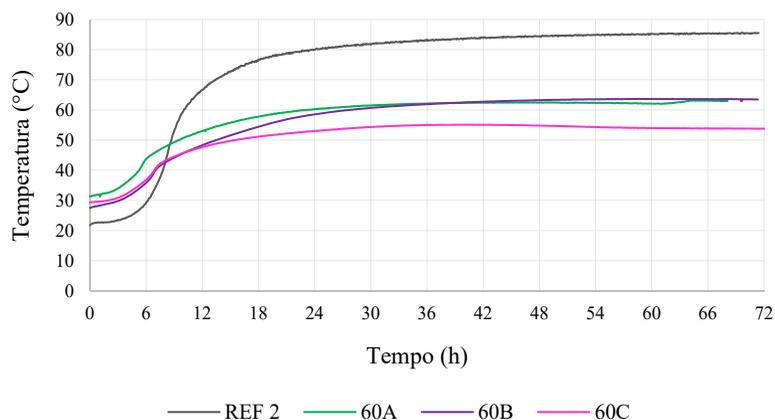
Na Figura 29, encontram-se as curvas de elevação adiabática de temperatura dos CAAs executados com a CVB, assim como a curva referente ao CAA REF 2.

Figura 29: Curvas de elevação adiabática de temperatura dos CAAs REF 2, 40B, 50B e 60B



Para os CAAs com 60% de substituição do cimento pelas cinzas volantes avaliadas neste estudo, as curvas de elevação adiabática de temperatura estão apresentadas na Figura 30. Para fins de comparação, apresentam-se novamente as curvas correspondentes aos CAAs REF 2 e 60B.

Figura 30: Curvas de elevação adiabática de temperatura dos CAAs REF 2, 60A, 60B e 60C



Além disso, para melhor compreender o comportamento térmico de cada CAA, na Tabela 27 estão apresentados os acréscimos de temperatura adiabática ( $\Delta T$ ) das misturas avaliadas com seus respectivos coeficientes de elevação adiabática de temperatura. Este coeficiente é resultado da razão entre a elevação adiabática de temperatura e o consumo de cimento do concreto em determinado intervalo de tempo. Assim, é possível verificar a elevação de temperatura adiabática unitária por kg de cimento (FURNAS, 1997). Como a elevação de temperatura é influenciada pelas adições reativas incorporadas ao concreto, neste caso o coeficiente foi encontrado utilizando-se o consumo total de aglomerante. Também, utilizou-se a temperatura de pico de cada CAA alcançada durante o período de realização do ensaio.

Tabela 27: Elevação de temperatura e coeficiente de elevação adiabática de temperatura dos CAAs

CAA	Aglomerante (kg/m <sup>3</sup> )	T inicial (°C)	T pico (°C)	$\Delta T$ (°C)	Coefficiente de elevação adiabática de T (°C/kg/m <sup>3</sup> )
REF 2*	519,1	21,8	85,6	63,8	0,123
40B	478,6	28,9	71,6	42,7	0,089
50B	452,4	29,5	71,6	42,1	0,093
60B	437,9	27,5	63,7	36,2	0,083
60A	412,3	31,3	63,1	31,8	0,077
60C	469,1	29,3	55,1	25,8	0,055

\* CAA com gelo; T = temperatura.

Todos os CAAs com cinza volante, avaliados no ensaio de calorimetria, apresentaram temperatura de pico inferior ao CAA REF 2. Isso demonstra que a substituição de cimento por teores iguais e superiores a 40% de cinza volante, de fato, minimiza a elevação de temperatura no concreto, concordando com o exposto por Bouzoubaâ e Lachemi (2001) e Atis (2002).

Com relação à utilização da CVB, conforme apresentado na Figura 29, o comportamento térmico dos CAAs 40B e 50B foi semelhante. A diferença dos valores de elevação adiabática de temperatura ( $\Delta T$ ) destes CAAs foi inferior a 1°C (Tabela 27). Além disso, o CAA 50B apresentou coeficiente de elevação adiabática de temperatura superior comparado ao CAA 40B, indicando que houve

influência do metacaulim. A redução de aproximadamente  $51 \text{ kg/m}^3$  de cimento no CAA 50B, em relação ao CAA 40B, não foi suficiente para minimizar o efeito ocasionado pela incorporação de aproximadamente  $19 \text{ kg/m}^3$  de metacaulim na mistura. Snelson, Wild e O'Farrell (2008) afirmam que, em certos níveis de substituição do cimento, a rápida reação pozolânica do metacaulim contribui significativamente na elevação da temperatura de misturas cimentícias, e que certas composições parecem contribuir com uma quantidade maior de calor do que a quantidade equivalente de cimento. Os autores mencionam ainda que a influência do metacaulim na liberação de calor é muito mais complexa e menos facilmente compreendida comparando-se com misturas cimentícias de cimento e cinza volante. Além disso, determinadas combinações ternárias (cimento - cinza volante - metacaulim) podem produzir uma quantidade maior de calor, conforme abordado subsequentemente.

Das misturas desenvolvidas com a CVB, o CAA 60B foi o que apresentou a menor elevação de temperatura ( $36,2^\circ\text{C}$ ) e o menor coeficiente de elevação adiabática de temperatura ( $0,083 \text{ }^\circ\text{C/kg/m}^3$ ). Mesmo contendo metacaulim na composição do CAA 60B, ficou evidente que para o teor de substituição do cimento de 60% a redução da elevação de temperatura adiabática foi mais eficaz. Pode-se assumir, então, que quanto maior o teor de substituição do cimento menor a elevação da temperatura do concreto. Isso concorda com as informações apresentadas por Bouzoubaâ e Lachemi (2001), Atis (2002), Herrera *et al.* (2011) e De La Varga *et al.* (2012), considerando que nestes casos as avaliações foram feitas em condições semiadiabáticas.

Comparando-se as diferentes cinzas utilizadas nesta pesquisa (Figura 30), para o teor de 60% de substituição do cimento, novamente percebe-se que houve influência do metacaulim nos resultados encontrados. Conforme exposto na Tabela 27, a elevação adiabática de temperatura destes CAAs foi maior para o CAA 60B, seguido do CAA 60A e, com menor valor de todos, o CAA 60C.

Possivelmente o maior consumo de metacaulim do CAA 60B, de  $22,8 \text{ kg/m}^3$ , tenha proporcionado a maior elevação adiabática de temperatura desta mistura quando comparado ao CAA 60A, que continha apenas  $13,5 \text{ kg/m}^3$  deste material. Esta observação é válida uma vez que a distribuição granulométrica da CVB apresentou-se levemente mais grossa comparada com a CVA. Além do mais, no ensaio *Chapelle* modificado, estas cinzas apresentaram valor médio de índice de atividade pozolânica semelhante (Tabela 21). Deve-se considerar também que o metacaulim utilizado, mesmo que em pequenas

proporções comparado ao cimento e à cinza volante, apresentava superfície específica bastante elevada (Tabela 16). Além disso, o índice de atividade pozolânica *Chapèlle* modificado deste material foi consideravelmente superior em relação à CVA e CVB, sendo aproximadamente 2,37 vezes maior. Estas características do metacaulim, aliadas à quantidade utilizada em cada CAA, certamente influenciaram na liberação de calor destas misturas. De acordo com Bai e Wild (2002), a alta e precoce atividade pozolânica do metacaulim, em conjunto com a aceleração da hidratação do cimento, contribui para o aumento de temperatura da mistura cimentícia. Segundo Dal Molin (2011), a capacidade de pequenas partículas em atuar como pontos de nucleação acelera a hidratação inicial do cimento. Além disso, no metacaulim, o calor gerado pode ser ainda maior devido à presença de aluminatos. Entretanto, neste tipo de mistura ternária, o efeito do metacaulim acaba sendo compensado pela menor reatividade das cinzas volantes e vice-versa (BAI; WILD, 2002). Prova disso, é que todos os CAAs com 60% de substituição do cimento por cinza volante apresentaram temperaturas adiabáticas inferiores ao CAA REF 2.

O CAA 60C, sem a presença de metacaulim, apresentou a menor elevação de temperatura, de 25,8°C. A CVC, comparada com as demais, apresentou a granulometria mais fina e o maior índice de atividade pozolânica *Chapèlle* modificado. No entanto, neste caso, possivelmente o baixo consumo de cimento prevaleceu em relação às propriedades da CVC. Paralelamente, fazendo-se um comparativo, o índice *Chapèlle* modificado do metacaulim foi 1,79 vezes mais elevado que o da CVC, além de sua superfície específica certamente também ser maior. Estes fatores justificam a maior elevação adiabática de temperatura nos CAAs 60A e 60B (com metacaulim, cinzas mais grossas e menos reativas) quando comparados com o CAA 60C (com a cinza mais reativa e fina que as demais, porém menos reativa e fina que o metacaulim).

Com relação ao coeficiente de elevação adiabática de temperatura, o valor encontrado para o CAA REF 2 de 0,123 °C/kg/m<sup>3</sup> assemelha-se ao verificado por Junckes (2015). Este, por sua vez, encontrou coeficientes de 0,128, 0,118 e 0,117 °C/kg/m<sup>3</sup> para concretos com consumo de cimento CP V-ARI de 262,59, 354,91 e 499,24 kg/m<sup>3</sup>, respectivamente.

Os valores dos coeficientes de todos os CAAs com cinza volante submetidos ao ensaio de calorimetria adiabática foram menores comparados ao CAA REF 2. Em relação aos CAAs produzidos com a CVB, ordenando-os do maior para o menor tem-se o CAA 50B, 40B e

60B, conforme mostrado na Tabela 27. Da mesma forma que foi abordado anteriormente, julga-se que o metacaulim tenha contribuído no comportamento térmico do CAA 50B, fazendo com que o calor liberado por unidade de material cimentício fosse superior em relação ao CAA 40B. É notório também que, para o teor de substituição do cimento por 60% da CVB, a redução no valor do coeficiente de elevação adiabática de temperatura foi mais expressiva.

Junckes (2015) encontrou coeficientes de elevação adiabática de temperatura de 0,110, 0,120 e 0,089 °C/kg/m<sup>3</sup>, respectivamente, para concretos com consumo de ligante de 395,45, 504,42 e 652,22 kg/m<sup>3</sup>. Nestas misturas, 45% do volume de cimento foi substituído por cinza volante. Com exceção do último concreto mencionado, o autor enfatiza que a elevação de temperatura adiabática não foi afetada pela utilização da cinza no lugar do cimento. Em relação ao coeficiente de 0,089 °C/kg/m<sup>3</sup>, Junckes (2015) justifica que a combinação de fatores como a utilização de alto consumo de aditivo polifuncional, baixa relação a/mc e o alto volume de substituição de cimento pela cinza volante contribuíram para que este concreto apresentasse comportamento diferente dos demais.

Relevando tais considerações, além das diferenças na dosagem e nas propriedades dos materiais utilizados, o coeficiente 0,089 °C/kg/m<sup>3</sup> encontrado por Junckes (2015) foi o mesmo verificado para o CAA 40B desenvolvido nesta pesquisa. Além disso, os demais CAAs apresentaram coeficientes semelhantes e até mesmo inferiores quanto maior o teor de substituição do cimento, especialmente nos casos de 60% de substituição (Tabela 27). Uma vez que a relação a/mc utilizada nos CAAs foi superior àquela utilizada por Junckes (2015) e pelo fato de não ter ocorrido retardo significativo para início da elevação da temperatura nos CAAs, apresentados a seguir, a principal justificativa para os baixos coeficientes encontrados, possivelmente, está vinculada aos elevados teores de cinza volante utilizados. Yoshitake *et al.* (2013) encontraram o valor de elevação adiabática de temperatura de aproximadamente 28,5°C, em três dias, para um concreto com 50% de cinza volante substituindo o cimento (338 kg/m<sup>3</sup> de ligante). Este valor resultou em um coeficiente de elevação adiabática de temperatura aproximado de 0,084 °C/kg/m<sup>3</sup>. Na idade de sete dias o coeficiente foi de 0,099 °C/kg/m<sup>3</sup>. Estes resultados também reforçam a afirmativa de que elevados teores de cinza volante, em substituição ao cimento, reduzem a elevação da temperatura do concreto em condições adiabáticas.

A reação pozolânica da cinza volante normalmente é lenta em função da sua superfície específica relativamente baixa e, também, devido à baixa solubilidade de seus componentes vítreos como a sílica e a alumina. Desse modo, a cinza volante atua inicialmente apenas como um material inerte. Posteriormente, devido à baixa reação pozolânica, a contribuição da cinza no calor de hidratação é pouco significativa. Assim, a redução de calor é tanto maior quanto o maior o teor de cinza volante (SNELSON; WILD; O'FARRELL, 2008).

No entanto, deve-se considerar que, em temperaturas elevadas, a reação pozolânica da cinza volante antecipa-se e ocorre de forma mais pronunciada que em temperatura ambiente (HANEHARA *et al.*, 2001; NARMLUK; NAWA, 2011; DESCHNER *et al.*, 2013). Esta aceleração da atividade pozolânica adianta também a geração de calor decorrente da própria cinza volante (JUNCKES, 2015). Esta contribuição de calor pode ter ocorrido nos CAAs com cinza volante avaliados, visto que todos ultrapassaram 50°C em 24 h. Conforme mencionado anteriormente, Narmluk e Nawa (2011) e Deschner *et al.* (2013) verificaram que a reação pozolânica da cinza volante iniciou antes de 20 h para a temperatura de cura a 50°C. Todavia, caso esta contribuição tenha ocorrido nos CAAs, não foi suficiente a ponto de elevar a temperatura adiabática ao nível do CAA REF 2.

Adotando um critério semelhante ao de Junckes (2015), verificou-se o tempo necessário para o início da elevação de temperatura dos CAAs. Este tempo, apresentado em horas na Tabela 28, foi considerado como sendo aquele correspondente a uma elevação de 5°C na temperatura desde o momento da mistura dos materiais.

Tabela 28: Tempo para início da elevação da temperatura em 5°C dos CAAs

CAA	REF 2	40B	50B	60B	60A	60C
Tempo (h)	4,3	4,5	4,4	5,3	4,6	5,3

Levando-se em consideração que o CAA REF 2 teve sua temperatura inicial reduzida, o tempo necessário para elevação da temperatura do mesmo, nesta condição, foi semelhante aos demais CAAs. Com relação à utilização da CVB, nas diferentes proporções em substituição ao cimento, o CAA 60B foi o que apresentou o maior tempo para início da elevação de temperatura. Dentre os CAAs com 60% de substituição do cimento pelas cinzas volantes, o CAA 60A apresentou o menor período de tempo.

Considerando que a água associada à cinza volante é disponibilizada para hidratação do cimento (SNELSON; WILD;

O'FARRELL, 2008), com o aumento do teor de cinza volante nas misturas, a relação a/c aumenta e, conseqüentemente, o grau de hidratação de cimento (WANG; PARK, 2015). Estas abordagens indicam que o pequeno retardo para elevação da temperatura ocorrido no CAA 60B pode não ter sido causado apenas pelo baixo consumo de cimento, mas talvez, também, pela presença do metacaulim. Devido à elevada superfície específica do metacaulim, o mesmo pode ter adsorvido rapidamente parte da água de mistura, diminuindo a quantidade disponível para a reação do cimento. Comportamento semelhante pode ter ocorrido no CAA 60C, devido à maior finura da CVC. Isso justificaria também o fato de o CAA 60A, que foi confeccionado com mais água que os demais, ter apresentado elevação de temperatura em um período de tempo ligeiramente inferior comparado aos CAAs 60B e 60C. Snelson, Wild e O'Farrell (2008) também abordaram o fato de que, em determinadas misturas cimentícias, o efeito do metacaulim é oposto ao da cinza volante, visto que, na primeira hora após a mistura, esse material diminui a hidratação do cimento devido à sua alta demanda de água. Além disso, segundo Langan, Weng e Ward (2002<sup>12</sup> *apud* JUNCKES, 2015), este comportamento, principalmente para teores mais elevados de cinza volante, pode estar relacionado com a adsorção dos íons de cálcio, da solução de poros, nas superfícies das partículas da cinza volante, retardando o processo de formação dos hidratos.

Entretanto, para o CAA 60A, deve-se levar em conta, também, que o mesmo apresentou temperatura inicial levemente superior aos demais, o que pode ter colaborado para a aceleração das reações de hidratação do cimento nesta mistura.

#### 4.4 CAAS NO ESTADO ENDURECIDO

Os valores de resistência à compressão e módulo de elasticidade apresentados a seguir referem-se a média de três e dois corpos de prova, respectivamente. Os valores utilizados na média da resistência à compressão atenderam ao limite de 20% em relação a  $f_c$ , conforme indica a NBR 8522 (2008). Resultados individuais de cada corpo de prova podem ser observados no Apêndice D.

##### 4.4.1 Resistência à compressão

Na Tabela 29 estão apresentados os valores médios de resistência à compressão dos CAAs. Em função da data de moldagem,

ainda não há resultados para a idade de 180 dias de todos os CAAs produzidos na Etapa 2.

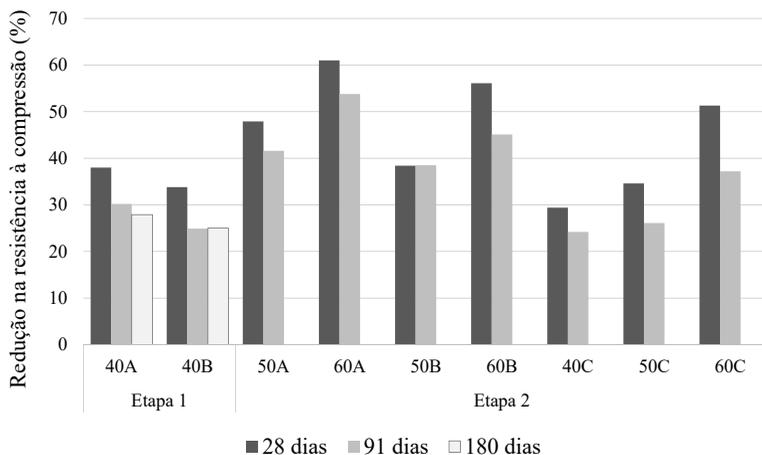
Tabela 29: Valores médios de resistência à compressão dos CAAs

	CAA	Resistência à compressão (MPa)		
		28 dias	91 dias	180 dias
Etapa 1	REF 1	87,3	92,6	99,3
	40A	54,1	64,6	71,6
	40B	57,8	69,5	74,5
Etapa 2	REF 2	88,7	98,8	*
	50A	46,2	57,7	*
	60A	34,6	45,6	*
	50B	54,6	60,8	*
	60B	38,9	54,2	*
	40C	62,6	74,9	*
	50C	58,0	73,0	*
60C	43,2	62,0	*	

\*Resultado não apresentado devido à idade de cura do CAA.

Para todas as idades avaliadas, os CAAs com cinza volante da Etapa 1 e Etapa 2 apresentaram valores de resistência à compressão significativamente inferiores quando comparados ao CAA REF 1 e REF 2, respectivamente. Estas reduções estão apresentadas na Figura 31, onde os valores percentuais são referentes a cada CAA de referência, ou seja, REF 1 para Etapa 1 e REF 2 para a Etapa 2.

Figura 31: Redução percentual nos valores de resistência à compressão dos CAAs com cinza volante em relação aos CAAs REF



Para as três cinzas volantes avaliadas, as reduções nos valores de resistência à compressão dos CAAs foram tanto maiores quanto maior o teor de substituição do cimento. Estas reduções são ocasionadas por diversos fatores. Inicialmente, a própria substituição do cimento pela cinza volante acarreta na elevação da relação a/c das misturas, conforme apresentado anteriormente no item 4.2.1. Além disso, principalmente para a idade de 28 dias, estas reduções são vinculadas também à reação pozolânica lenta da cinza volante com o  $\text{Ca(OH)}_2$  do cimento hidratado. Do mesmo modo, com o aumento do teor de cinza volante, a redução do volume de cimento resultará em menor conteúdo de  $\text{Ca(OH)}_2$  e, conseqüentemente, menor taxa de reação pozolânica da cinza volante (LIU, 2010; SUA-IAM; MAKUL, 2014).

Ademais, conforme relatado por Hoppe Filho (2008), a menor resistência à compressão nestes casos deve-se também à maior porosidade da matriz, visto que, esta propriedade depende basicamente da hidratação do cimento e a cinza volante atua apenas refinando a microestrutura. Shaikh e Supit (2015) verificaram maior volume total de poros, principalmente poros capilares, em pastas com elevados teores de cinza volante, comparadas à pasta feita apenas com cimento, aos 28 dias. Este efeito, justificado devido a menor quantidade de C-S-H, foi mais pronunciado na pasta com 60% de cinza volante em comparação com aquela que continha 40% desta pozolana substituindo o cimento.

Estas abordagens justificam também as reduções mais acentuadas nos valores de resistência à compressão dos CAAs com 60% de cinza volante, verificadas neste estudo.

Em praticamente todos os CAAs com cinza volante, as reduções nos valores de resistência à compressão foram mais expressivas aos 28 dias, comprovando a influência da baixa reatividade das cinzas nos períodos iniciais de cura.

Os CAAs com a CVA, comparados aos CAAs com a CVB, apresentaram os menores valores de resistência à compressão, para todos os teores de substituição do cimento avaliados. Diferentes parâmetros podem ter contribuído para estes resultados. Com relação à substituição de 40% de cimento, a redução do volume de água em 3 L/m<sup>3</sup> no CAA 40B pode ter auxiliado na maior resistência à compressão deste CAA em relação ao CAA 40A. Para os teores de 50% e 60% de substituição do cimento, os CAAs 50A e 60A foram produzidos com 10 L/m<sup>3</sup> a mais de água em comparação aos CAAs 50B e 60B. Além disso, o consumo de metacaulim dos CAAs 50B e 60B também foi superior em relação ao utilizado nos CAAs com a CVA. Estas situações beneficiaram no melhor desempenho quanto à resistência à compressão dos CAAs com a CVB, os quais também podem ter sido favorecidos pela maior reação pozolânica desta cinza volante. Esta última afirmação pode ser relacionada com os valores encontrados no ensaio de índice de desempenho com cimento Portland aos 28 dias, em que a CVB apresentou resultado ligeiramente superior comparada com a CVA. Além disso, se observados os valores individuais do ensaio de *Chapelle* modificado, a CVB também apresentou o maior índice de atividade pozolânica. Entretanto, a média dos valores apontou desempenho similar entre a CVA e CVB neste último ensaio.

Certamente, em função da maior finura e conseqüentemente da maior atividade pozolânica da CVC, comprovada pelos ensaios de desempenho com cimento Portland e *Chapelle* modificado, os CAAs com a CVC apresentaram as menores reduções nos valores de resistência à compressão, em todos os teores de substituição do cimento. Ainda, a maior finura desta cinza volante pode ter contribuído na redução da porosidade total da matriz, assim como na diminuição do diâmetro dos poros (SHAIKH; SUPIT, 2015). O CAA 60C, por exemplo, apresentou valor médio de resistência à compressão de 43,2 MPa aos 28 dias, enquanto os CAAs 60A e 60B alcançaram, nesta mesma idade, valores de 34,6 e 38,9 MPa, respectivamente.

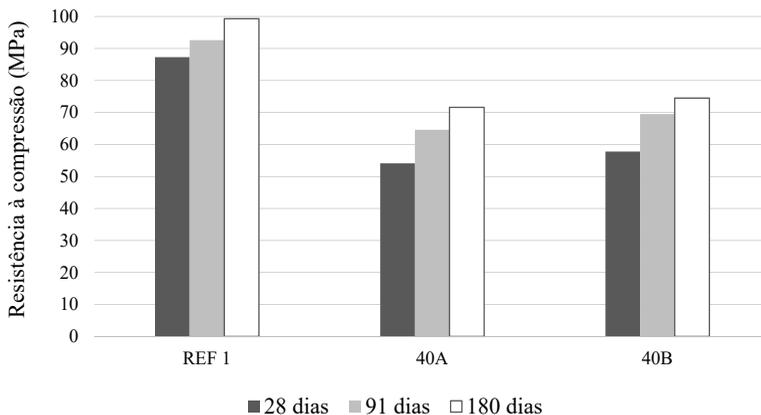
Percebe-se também, que, nos CAAs com 50% e 60% de substituição de cimento pela CVA e CVB a incorporação do metacaulim

não foi suficiente para suprir a baixa atividade pozolânica destas cinzas. Este comportamento dos CAAs com elevados teores de cinza volante e misturas ternárias de ligante indica que a cinza volante controla a redução da resistência à compressão. Contudo, este efeito negativo é parcialmente compensado pelo uso combinado de cinza volante com o metacaulim (GÜNEYISI; GESOĞLU; ÖZBAY, 2010). A maior resistência à compressão proporcionada pelo metacaulim é atribuída ao efeito de preenchimento proporcionado por suas partículas extremamente finas, à aceleração da hidratação do cimento e a rápida reação pozolânica com o  $\text{Ca(OH)}_2$  (MADANDOUST; MOUSAVI, 2012).

Todavia, vale a pena ressaltar que tanto a CVA como a CVB foram coletadas em concreteiras. Deste modo, são amostras representativas do material aplicado em concretos convencionais. Deve-se considerar, também, que estas cinzas não passaram por processos de moagem e que a granulometria mais grossa, de ambas, minimizou não apenas o efeito devido à ação pozolânica, mas também relacionados ao efeito de nucleação e preenchimento (microfiller). Segundo Dal Molin (2011), o efeito microfiller resulta do preenchimento dos vazios pelas minúsculas partículas das adições, que devem apresentar diâmetro médio menor ou semelhante ao das partículas do cimento. Do mesmo modo, o efeito de nucleação é causado pelas pequenas partículas das adições que aceleram as reações e permitem também o crescimento dos cristais nos poros ocupados pela adição e pela água. Além disso, a reação pozolânica lenta ou rápida das adições dependem da sua superfície específica e da composição química. Todas estas observações podem ser vinculadas também ao bom desempenho da CVC.

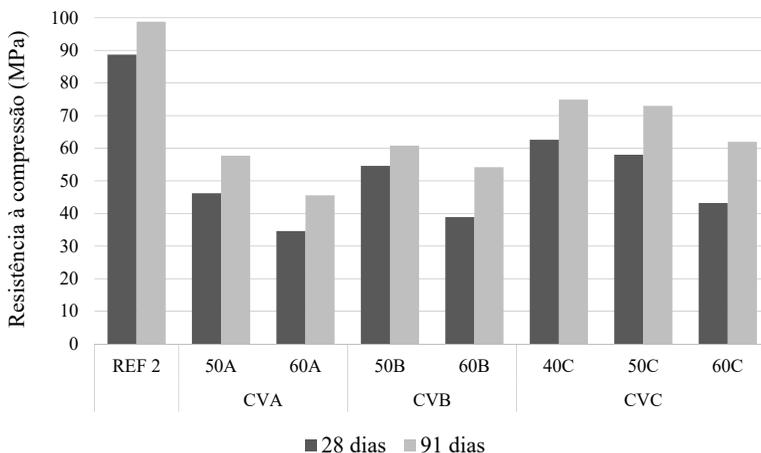
Na Figura 32 estão apresentados os resultados de resistência à compressão dos CAAs executados na Etapa 1.

Figura 32: Valores de resistência à compressão dos CAAs produzidos na Etapa 1



A Figura 33, por sua vez, apresenta os valores de resistência à compressão dos CAAs produzidos na Etapa 2.

Figura 33: Valores de resistência à compressão dos CAAs produzidos na Etapa 2



É possível verificar que, apesar da redução na resistência à compressão dos CAAs com cinza volante, houve aumento desta

propriedade mecânica em função do maior tempo de cura, confirmando que a atividade pozolânica das cinzas se eleva com o tempo.

Para os CAAs produzidos na Etapa 1, o ganho de resistência de 28 para 91 dias de idade dos CAAs REF 1, 40A e 40B foi de aproximadamente 6,1%, 19,4% e 20,2%, respectivamente. Entretanto, de 91 para 180 dias os CAAs REF 1, 40A e 40B apresentaram ganhos nos valores de resistência à compressão de 7,2%, 10,8% e 7,2%, respectivamente, sendo estes percentuais inferiores ao verificado no período de 28 para 91 dias dos CAAs com cinza volante. Nos resultados apresentados por Celik *et al.* (2015), para substituições do cimento em massa de 30% e 50%, os maiores ganhos nos valores de resistência à compressão também ocorreram entre 28 e 91 dias, comparados aos acréscimos verificados entre as idades de 91 e 365 dias. Possivelmente este comportamento deve-se a maior disponibilidade de íons de cálcio na solução de poros no período de 28 a 91 dias. Como o cimento hidrata-se em grande parte até 28 dias e a cinza volante, em temperatura ambiente, normalmente intensifica sua atividade pozolânica a partir deste período, o consumo do  $\text{Ca(OH)}_2$ , neste mesmo período, eleva-se. Desta forma, em períodos mais longos, acima de 91 dias por exemplo, a concentração de  $\text{Ca(OH)}_2$  reduz e, conseqüentemente, a reação pozolânica.

Estes acréscimos, considerando o período de 28 para 91 dias, foram maiores quanto maior o teor e cinza volante utilizado em substituição ao cimento. Na Etapa 2, os CAAs 50A, 50B e 50C apresentaram aumento nos valores de resistência à compressão de 24,9%, 11,4% e 25,9%, respectivamente. Entretanto, os CAAs 60A, 60B e 60C exibiram crescimento de aproximadamente 31,7%, 39,3% e 43,4%, nesta ordem. Para este mesmo período, o CAA REF 2 elevou sua resistência à compressão em 11,4% e o CAA 40C em 19,6%. O maior acréscimo nos valores de resistência à compressão para CAAs com teores mais elevados de cinza volante pode estar relacionado com a maior área superficial disponível da pozolana para reação. Ou seja, o fato de haver maior superfície das cinzas em contato com a solução de poros favorece a uma maior dissolução da sílica, por exemplo, para reagir com o  $\text{Ca(OH)}_2$  e formar C-S-H. Esta observação é coerente com os resultados verificados, visto que, na Etapa 2, dos CAAs com 50% e 60% de cinza volante em substituição ao cimento, aqueles produzidos com a CVC apresentaram os maiores acréscimos na resistência à compressão, assim como as menores reduções. Além disso, comparando-se os CAAs com 40% de substituição do cimento, percebe-

se que os valores de resistência à compressão destas misturas apresentaram aumentos semelhantes entre o período de 28 a 91 dias. Todavia, há de se levar em conta que nos CAAs 40A e 40B, além da substituição do cimento, mais 10% em volume de areia fina foi substituído pelas respectivas cinzas volantes, fato que não ocorreu no CAA 40C.

Os resultados encontrados demonstraram ainda que a diferença na resistência à compressão entre o CAA feito apenas com cimento e os CAAs com cinza volante diminui com o tempo. O mesmo comportamento foi relatado por Yazici (2008) e Liu (2010). Entretanto, Liu (2010) também enfatiza que a presença de baixo consumo de cimento pode não disponibilizar  $\text{Ca(OH)}_2$  em quantidade suficiente para reagir com toda a cinza volante presente na mistura. Desta forma, quanto maior o teor de cinza volante menor a quantidade de  $\text{Ca(OH)}_2$  e, de modo geral, menor a resistência à compressão. Esse desempenho dos CAAs, para cada cinza volante e cada teor utilizado neste estudo, poderá ser verificado com os corpos de prova que foram moldados para rompimento aos 180 e 365 dias.

A fim de comprovar a influência dos diferentes teores e cinzas volantes avaliados, assim como da idade de cura nos valores de resistência à compressão dos CAAs com cinza volante, analisou-se os dados estatisticamente. Para tanto, os resultados dos CAAs 40A e 40B foram equiparados em relação ao CAA REF 2, mantendo-se o mesmo percentual de redução nos valores de resistência verificados em relação ao CAA REF 1. Destaca-se ainda que as análises estatísticas apresentadas a seguir consideram apenas as variáveis comuns a todos os CAAs com cinza volante, ou seja, tipos distintos de cinza volante, teores de substituição do cimento e idade de cura (28 e 91 dias). Sendo assim, as particularidades de cada traço, como a utilização de metacaulim ou cinza volante em substituição da areia fina não foram avaliadas.

A partir de uma análise de variância (ANOVA), apresentada na Tabela 30, pode-se verificar a influência dos parâmetros nos valores de resistência à compressão dos CAAs com cinza volante em substituição ao cimento.

Tabela 30: ANOVA – influência dos parâmetros na resistência à compressão dos CAAs com cinza volante

Fonte	SQ	GL	MQ	F Calculado	F Tabelado	Influência ( $F_{cal} > F_{tab}$ )
Cinza	1077,63	2	538,82	170,18	3,26	Sim
Teor	3421,59	2	1710,80	540,35	3,26	Sim
Idade	2383,99	1	2383,99	752,98	4,11	Sim
Cinza x teor	91,14	4	22,78	7,20	2,63	Sim
Cinza x idade	29,84	2	14,92	4,71	3,26	Sim
Teor x idade	40,83	2	20,41	6,45	3,26	Sim
Cinza x teor x idade	81,92	4	20,48	6,47	2,63	Sim
Resíduos	113,98	36	3,17			
Total	7240,92	53				

Percebe-se que todos os parâmetros avaliados, inclusive a interação entre eles, influenciaram significativamente (com 95% de confiança) nos valores de resistência à compressão dos CAAs com cinza volante. Se avaliados estatisticamente os fatores de maior influência, o teor de cinza volante foi o que mais influenciou na resistência à compressão dos CAAs, seguido da idade de cura e posteriormente pelo tipo de cinza volante.

Verificou-se também se as médias dos valores de resistência à compressão dos CAAs com cinza volante apresentaram diferenças significativas entre si, por meio de uma comparação de múltiplas médias. Para tanto, utilizou-se novamente o teste de análise de variância (ANOVA). A condição de normalidade dos resíduos com relação à média de cada grupo foi verificada pelo teste Kolmogorov-Smirnov e atendida, assim como a distribuição dos resíduos em relação a cada média foi uniforme e verificada pelo teste de Bartlett. A Tabela 31 apresenta a comparação para as médias dos valores encontrados para as diferentes cinzas volantes, em relação a cada teor de substituição do cimento.

Tabela 31: ANOVA - comparação dos valores médios de resistência à compressão dos CAAs para as diferentes cinzas volantes

CAA	28 dias			91 dias		
	Fcal	Ftab	Diferença (Fcal > F tab)	Fcal	Ftab	Diferença (Fcal > F tab)
40A-40B-40C	39,07		DS*	3,39		ND**
50A-50B-50C	58,81	5,14	DS	44,92	5,14	DS
60A-60B-60C	40,50		DS	208,84		DS

\* DS = apresenta diferença significativa; ND = não apresenta diferença significativa.

Pode-se perceber que, tanto aos 28 quanto aos 91 dias de cura dos CAAs, houve diferença significativa (com 95% de confiança) nos valores de resistência à compressão para os três tipos de cinza volante avaliados, independentemente do teor de substituição do cimento. Excetuando-se, neste caso, os CAAs com 40% de substituição do cimento aos 91 dias, onde os valores médios não apresentaram diferenças significativas.

A Tabela 32, por sua vez, apresenta a comparação entre médias dos valores de resistência à compressão para os diferentes teores de cada cinza volante utilizada.

Tabela 32: ANOVA - comparação de médias dos valores de resistência à compressão para diferentes teores de cada cinza volante

CAA	28 dias			91 dias		
	Fcal	Ftab	Diferença (Fcal > F tab)	Fcal	Ftab	Diferença (Fcal > F tab)
40A-50A-60A	190,27		DS*	82,69		DS
40B-50B-60B	323,19	5,14	DS	37,92	5,14	DS
40C-50C-60C	182,36		DS	99,40		DS

\* DS = apresenta diferença significativa.

Novamente, percebe-se que existe diferença significativa entre as médias dos valores de resistência à compressão para os diferentes teores de cada cinza volante avaliados em substituição ao cimento, independentemente da cinza volante e idade de cura dos CAAs.

A utilização de elevados teores de cinza volante busca, entre outras possibilidades, reduzir o consumo de cimento e aumentar a sua eficiência. Um indicador que mede a quantidade de cimento por m<sup>3</sup> necessária para fornecer 1 MPa pode ser utilizado para verificar a

eficiência do uso do cimento (DAMINELI *et al.*, 2010). Este indicador, denominado de indicador de desempenho, de cada CAA, está apresentado na Tabela 33.

Tabela 33: Indicador de desempenho do uso do cimento nos CAAs

	CAA	Consumo de cimento (kg/m <sup>3</sup> )	Indicador de desempenho ((kg/m <sup>3</sup> )/MPa)		
			28 dias	91 dias	180 dias
Etapa 1	REF 1	519,2	5,95	5,61	5,23
	40A	308,9	5,71	4,78	4,31
	40B	308,7	5,34	4,44	4,14
Etapa 2	REF 2	519,1	5,85	5,25	*
	50A	255,4	5,53	4,43	*
	60A	204,9	5,92	4,50	*
	50B	257,6	4,72	4,24	*
	60B	205,3	5,28	3,79	*
	40C	307,1	4,91	4,10	*
	50C	258,7	4,46	3,54	*
	60C	205,3	4,75	3,31	*

\*Resultado não apresentado devido à idade de cura do CAA.

Aos 28 dias, com exceção do CAA 60A, todos os CAAs com cinza volante apresentaram um consumo menor de cimento por MPa em comparação aos CAAs REF, executados apenas com cimento. Este benefício proporcionado pela utilização de elevados teores de cinza volante foi, em geral, mais acentuado com o aumento do período de cura, como aos 91 dias. Para esta mesma idade, percebe-se que os CAAs com cinza volante apresentaram indicadores consideravelmente menores que seus respectivos CAAs de referência, destacando-se o CAA 60C que apresentou o melhor resultado.

Na pesquisa realizada por Liu (2010), este indicador de desempenho, aos 90 dias, foi de 5,28 e 4,56 (kg/m<sup>3</sup>)/MPa, respectivamente para CAAs com 40% e 60% de substituição de cimento por cinza volante. Celik *et al.* (2015) desenvolveram um CAA com 50% de cinza volante substituindo o cimento, onde o indicador de desempenho do cimento aos 91 dias foi de 4,09 (kg/m<sup>3</sup>)/MPa.

Estes dados indicam que é possível executar estruturas com utilização de CAAs com elevados teores de cinza volante, reduzindo o consumo de cimento e alcançando a médio e longo prazo resistências à compressão superiores a 40 MPa, com redução do impacto ambiental causado pelo uso excessivo de cimento.

Além das observações supracitadas, deve-se considerar também que diferentes composições de materiais e/ou diferentes materiais podem proporcionar valores de resistência à compressão, assim como de

elevação adiabática de temperatura, similares em concretos. Deste modo, e paralelamente, outra avaliação de eficiência que pode ser aplicada para os CAAs refere-se à razão entre a elevação adiabática de temperatura ( $\Delta T$ ) e a resistência à compressão de cada mistura, conforme apresentado na Tabela 34. Considerando-se, no entanto, que os valores de resistência à compressão dos CAAs foram provenientes da cura em temperatura de  $(23 \pm 2)^\circ\text{C}$ .

Tabela 34: Relação entre a elevação adiabática de temperatura e a resistência à compressão dos CAAs

CAA	$\Delta T$ ( $^\circ\text{C}$ )	Resistência à compressão (MPa)		Relação $^\circ\text{C}/\text{MPa}$	
		28 dias	91 dias	28 dias	91 dias
REF 2	63,8	88,7	98,8	0,72	0,65
40B	42,7	57,8	69,5	0,74	0,61
50B	42,1	54,6	60,8	0,77	0,69
60B	36,2	38,9	54,2	0,93	0,67
60A	31,8	34,6	45,6	0,92	0,70
60C	25,8	43,2	62,0	0,60	0,42

Percebe-se que, aos 28 dias, os CAAs com cinza volante, exceto o CAA 60C, apresentaram relação  $^\circ\text{C}/\text{MPa}$  superior quando comparados ao CAA REF 2. Isso indica que, para esta idade de avaliação, os CAAs com cinza volante apresentaram eficiência inferior comparados ao CAA REF 2, quando vinculados tais parâmetros. Opostamente, o CAA 60C apresentou o melhor desempenho em relação a todos os outros CAAs.

Para a idade de 91 dias, os CAAs com 60% de substituição do cimento por cinza volante melhoraram significativamente este indicador, sendo estas melhorias muito mais expressivas que aquelas observadas para os CAAs REF 2, 40B e 50B. Contudo, para esta idade de avaliação, a relação  $^\circ\text{C}/\text{MPa}$  de todos os CAAs, excetuando-se novamente o CAA 60C, foi semelhante. Ou seja, a utilização de CAAs com elevados teores de cinza volante pode ser um sistema vantajoso para aplicação em grandes blocos de fundação, no entanto, para especificações técnicas de resistência à compressão em idades mais avançadas. Todavia, conforme apresentado na Tabela 34, o CAA 60C exibiu a menor elevação de temperatura por unidade de resistência à compressão, em ambas as idades, indicando, novamente, que o uso de cinzas volantes com propriedades adequadas apresenta grandes benefícios para este sistema construtivo.

#### 4.4.2 Módulo de elasticidade

Na Tabela 35, estão apresentados os valores médios de módulo de elasticidade dos CAAs. Destaca-se que, para o CAA REF 1 aos 28 dias, utilizou-se apenas o valor de módulo de elasticidade de um corpo de prova. Esta decisão foi tomada pois verificou-se um resultado discrepante para o segundo corpo de prova, que pode ter sido ocasionado por um erro no momento do ensaio.

Tabela 35: Valores médios de módulo de elasticidade dos CAAs

	CAA	Módulo de elasticidade (GPa)		
		28 dias	91 dias	180 dias
Etapa 1	REF 1	41,3	43,7	43,8
	40A	35,9	41,8	43,0
	40B	39,8	45,2	43,4
Etapa 2	REF 2	42,9	43,3	*
	50A	31,8	35,3	*
	60A	30,4	33,6	*
	50B	37,9	39,3	*
	60B	33,5	37,2	*
	40C	37,1	41,9	*
	50C	36,7	40,9	*
	60C	34,7	41,2	*

\*Resultado não apresentado devido à idade de cura do CAA.

Os CAAs REF 1 e REF 2 apresentaram valores similares tanto aos 28, quanto aos 91 dias de idade.

Com relação aos CAAs produzidos com cinza volante em substituição ao cimento, em todos os casos, exceto para o CAA 40B aos 91 dias, os valores de módulo de elasticidade foram inferiores comparados aos CAAs REF. A Tabela 36 apresenta a redução percentual de cada CAA com cinza volante, em cada idade, comparando-o com seu respectivo traço de referência, ou seja, REF 1 para Etapa 1 e REF 2 para a Etapa 2.

Tabela 36: Redução percentual nos valores de módulo de elasticidade dos CAAs com cinza volante em relação aos CAAs REF

	CAA	Redução no módulo de elasticidade (%)		
		28 dias	91 dias	180 dias
Etapa 1	40A	13,1	4,3	1,8
	40B	3,6	-3,4	0,9
Etapa 2	50A	25,9	18,5	*
	60A	29,1	22,4	*
	50B	11,7	9,2	*
	60B	21,9	14,1	*
	40C	13,5	3,2	*

50C	14,5	5,5	*
60C	19,1	5,0	*

---

\*Resultado não apresentado devido à idade de cura do CAA.

Da mesma forma como ocorreu na resistência à compressão, as reduções nos valores de módulo de elasticidade foram maiores aos 28 dias e diminuíram em função do maior tempo de cura. Além do mais, para todas as cinzas avaliadas neste estudo, quanto maior o teor de substituição do cimento menor o valor de módulo de elasticidade, especialmente aos 28 dias.

Para os CAAs pertencentes à Etapa 1, nas idades de 28 e 180 dias, percebe-se que, o CAA 40B apresentou redução inferior se comparado ao CAA 40A. Este efeito possivelmente ocorreu em função da maior rigidez da pasta do CAA 40B, ocasionada pelo menor volume de água em relação ao volume de materiais cimentícios, visto que, em ambos os CAAs, o volume de ligante foi praticamente o mesmo. Conforme exposto na Tabela 35, para a idade de 91 dias, encontrou-se para o CAA 40B valor médio de módulo de elasticidade de 45,2 GPa. Este resultado foi ligeiramente superior em relação ao verificado para a idade de 180 dias, que foi de 43,4 GPa. A fim de comprovar o resultado obtido aos 180 dias realizou-se o ensaio em mais 1 corpo de prova, obtendo-se o valor de 43,2 GPa. Manteve-se, portanto, o valor de médio de 43,4 GPa para o CAA 40B aos 180 dias. Estes resultados de módulo de elasticidade podem ser provenientes de variações em função da própria metodologia do ensaio. Entretanto, há de se levar em conta que aos 180 dias os CAAs REF 1, 40A e 40B praticamente se igualaram, uma vez que apresentaram valores médios de módulo de elasticidade 43,8, 43,0 e 43,4 GPa, respectivamente. Pode-se afirmar então que, a longo prazo os valores de módulo de elasticidade de um concreto feito com substituição de cimento por 40% de cinza volante, em volume, pode equivaler-se a um concreto feito apenas com cimento, considerando-se as particularidades de cada traço.

Avaliando-se os CAAs produzidos na Etapa 2, pode-se visualizar na Tabela 36 que as reduções mais significativas de todos os CAAs com cinza volante referem-se aos CAAs 50A e 60A, nas duas idades avaliadas. Novamente, estima-se que a maior quantidade de água utilizada nos CAAs 50A e 60A, além dos efeitos da própria cinza volante, tenham gerado uma matriz mais fraca, contribuindo assim no menor desempenho quanto ao módulo de elasticidade destas misturas. Além disso, comparando-se os CAAs 50A e 60A com os CAAs 50B e 60B (Tabela 35), estima-se que os melhores resultados alcançados pelos

CAAs com a CVB também foram influenciados pelo maior consumo de metacaulim destes CAAs. Em função da elevada finura deste material, a matriz cimentícia dos CAAs 50B e 60B possivelmente apresentou-se mais densa comparada com aquela dos CAAs 50A e 60A, nesta mesma ordem.

Dos CAAs com cinza volante produzidos na Etapa 2, os CAAs produzidos a CVC apresentaram as menores reduções nos valores de módulo de elasticidade em relação ao CAA REF 2. Isso indica que a maior finura da CVC contribuiu positivamente, principalmente, aos 91 dias.

De qualquer forma, quando se avalia as reduções nos valores de módulo de elasticidade dos CAAs com cinza volante, em relação aos CAAs feitos apenas com cimento, percebe-se que estas foram inferiores comparadas ao decréscimo observado para a resistência à compressão, em todas as idades. Considerando que o volume de agregado graúdo foi semelhante nos CAAs, este menor efeito devido à substituição do cimento por cinza volante no módulo de elasticidade pode ser relacionado ao fato de que a pasta endurecida e a zona de transição têm maior efeito sobre a resistência à compressão do concreto. No entanto, os agregados desempenham importante função no módulo de elasticidade (MENGXIAO; QIANG; ZHIKAI, 2015). Além disso, pode-se relacionar este comportamento ao efeito de preenchimento ocasionado pelas partículas de cinza volante no concreto (SIVASUNDARAM; CARETTE; MALHOTRA, 1990), principalmente aos 28 dias. Neste sentido, há de se levar em consideração que nos CAAs com substituição do cimento por cinza volante, parcela da areia fina também foi substituída por cinza volante ou metacaulim, com exceção do CAA 40C. Este fato acarretou no aumento do volume de finos nestes CAAs e possivelmente contribuiu para o efeito de preenchimento na mistura.

Com o aumento da idade de cura, os CAAs com cinza volante apresentaram melhorias nos valores de módulo de elasticidade. Para melhor visualizar o comportamento destes CAAs, na Figura 34 e Figura 35, estão representados os valores médios de módulo de elasticidade dos CAAs executados na Etapa 1 e Etapa 2, respectivamente.

Figura 34: Valores de módulo de elasticidade dos CAAs produzidos na Etapa 1

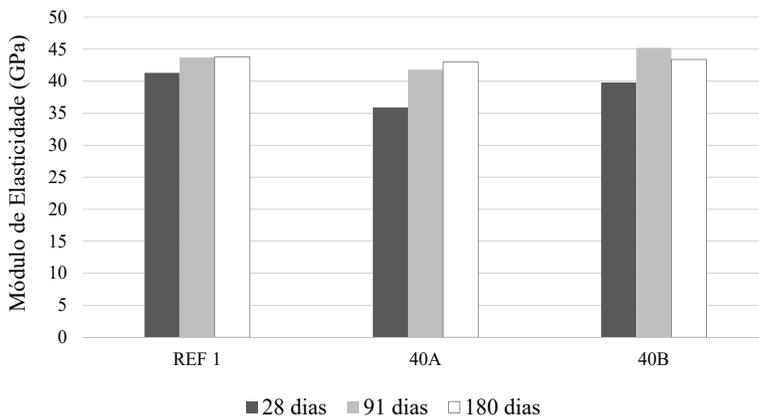
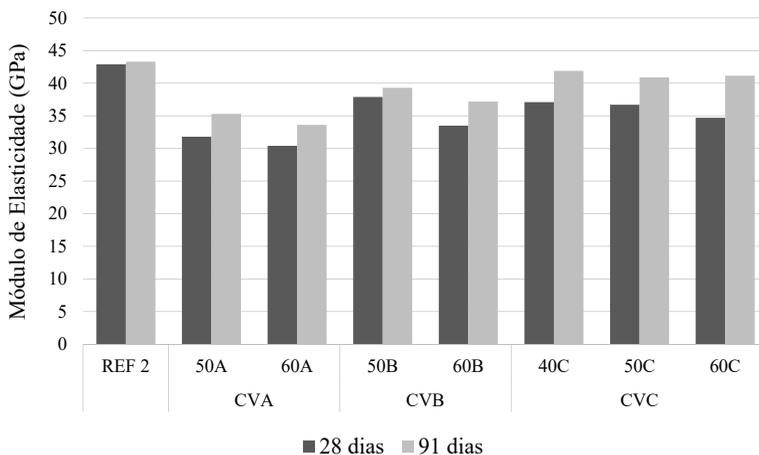


Figura 35: Valores de módulo de elasticidade dos CAAs produzidos na Etapa 2



Os CAAs REF 1 e REF 2 apresentaram acréscimos nos valores de módulo de elasticidade de 5,8% e 0,9%, respectivamente, com aumento da idade de cura de 28 para 91 dias. Entretanto, aos 91 dias, os valores praticamente se igualaram. Assumindo como parâmetro o CAA REF 1, para o período de 91 a 180 dias a elevação no módulo de elasticidade foi de apenas 0,2%, indicando a estabilização desta propriedade aos 91 dias para o concreto feito apenas com cimento.

Ao observar os CAAs 40A e 40B, pertencentes a Etapa 1, verifica-se acréscimos de 16,4% e 13,6%, respectivamente, com o aumento da idade de cura de 28 para 91 dias. De 91 para 180 dias o valor médio de módulo aumentou em 2,9% para o CAA 40A. Para o CAA 40B o desenvolvimento do módulo de elasticidade, neste mesmo período, não apresentou acréscimo devido aos valores encontrados em ambas as idades. No entanto, avaliando-se os demais CAAs, acredita-se que os valores de 180 dias representem melhor o comportamento do CAA 40B. De qualquer forma, este CAA também apresentou aumento no módulo de elasticidade em função do tempo.

Na Etapa 2, no período de 28 para 91 dias de cura, os CAAs 50A e 60A apresentaram acréscimos nos valores de módulo de elasticidade de 11,0% e 10,6%, respectivamente. Os CAAs 50B e 60B elevaram seus valores em 3,7% e 11,0%, enquanto nos CAAs 40C, 50C e 60C os aumentos foram de 12,9%, 11,4% e 18,6%, nessa ordem.

Conforme abordado anteriormente, o agregado graúdo apresenta atuação significativa no módulo de elasticidade. No entanto, devido às próprias diferenças verificadas entre os CAAs, com diferentes teores e cinzas volantes, é evidente que a pasta também tem seu percentual de influência, sendo esta parcela controlada principalmente pela porosidade da matriz (LIU, 2010).

Em todos os casos, os acréscimos nos valores de módulo dos CAAs com cinza volante foram superiores ao verificado nos CAAs de referência. Estes acréscimos são decorrentes da atividade pozolânica das cinzas, que consomem o  $\text{Ca(OH)}_2$  produzindo produtos de hidratação estáveis, como o C-S-H, refinando a estrutura de poros e, conseqüentemente, aumentando a rigidez da pasta. Isso é confirmado, pois do mesmo modo como ocorreu com os valores de resistência à compressão, na Etapa 2, os maiores acréscimos foram verificados nos CAAs com a CVC, especialmente no CAA 60C. Este comportamento reflete à maior atividade pozolânica desta cinza volante com o aumento da idade de cura, devido à sua maior finura e conseqüentemente área superficial disponível para reagir com o  $\text{Ca(OH)}_2$ .

Efeitos similares ocorrem a partir da utilização do metacaulim, no entanto, em períodos menores visto sua maior reatividade e superfície específica em relação à cinza volante. Mesmo sendo utilizado em quantidades consideravelmente menores comparado com a CVA e a CVB, certamente a presença do metacaulim influenciou também nos resultados encontrados de módulo de elasticidade dos CAAs 50A, 60A, 50B e 60B. Dos CAAs com 50% de substituição de cimento por cinza

volante, o CAA 50B foi o que apresentou o menor aumento nos valores de módulo em função do maior tempo de cura. Entretanto, destes CAAs, aos 28 dias, foi o que alcançou o maior módulo de elasticidade. Isso indica que a quantidade de metacaulim utilizada neste caso, combinado ao volume de cimento e CVB, antecipou as reações de hidratação e pozolânicas.

Da mesma forma como procedeu-se anteriormente com os valores de resistência à compressão, realizou-se uma avaliação estatística por meio do método de análise de variância (ANOVA) para os resultados de módulo de elasticidade dos CAAs com cinza volante. Enfatiza-se, novamente, que nos dados avaliados não se considerou as particularidades de cada traço, como por exemplo os CAAs com ou sem utilização de metacaulim em sua composição. Deste modo, os fatores de influência verificados referem-se aos diferentes tipos e teores de cinza volante e idades de cura (28 e 91 dias) dos CAAs. A influência destes parâmetros pode ser verificada na Tabela 37.

Tabela 37: ANOVA – influência dos parâmetros no módulo de elasticidade dos CAAs com cinza volante

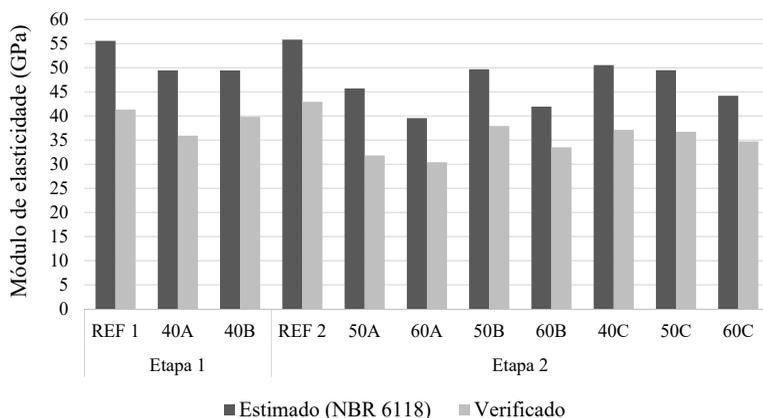
Fonte	SQ	GL	MQ	F Tabelado	F Calculado	Influência ( $F_{cal} > F_{tab}$ )
Cinza	128,01	2	64,01	439,98	3,55	Sim
Teor	190,55	2	95,27	654,92	3,55	Sim
Idade	129,60	1	129,60	890,90	4,41	Sim
Cinza x teor	53,24	4	13,31	91,49	2,93	Sim
Cinza x idade	9,47	2	4,74	32,56	3,55	Sim
Teor x idade	3,03	2	1,52	10,43	3,55	Sim
Cinza x teor x idade	2,81	4	0,70	4,83	2,93	Sim
Resíduos	2,62	18	0,15			
Total	519,34	35				

Todos os parâmetros avaliados e suas inter-relações influenciaram significativamente (com 95% de confiança) nos resultados de módulo de elasticidade dos CAAs com cinza volante. A maior influência está vinculada aos diferentes teores de substituição do cimento pelas cinzas volantes, seguido da idade de cura dos CAAs e do tipo de cinza volante utilizada.

Os valores de módulo de elasticidade encontrados para os CAAs foram comparados com os valores estimados segundo as indicações de cálculo da NBR 6118 (2014), para a idade de 28 dias.

Todavia, vale ressaltar que nos cálculos considerou-se a resistência à compressão média de cada CAA, enquanto a NBR 6118 (2014) aborda a utilização do  $f_{ck}$  do concreto. No entanto, os valores calculados são utilizados apenas para fins de comparação. Além disso, destaca-se que os valores estimados de módulo de elasticidade ( $E_{ci}$ ) foram calculados com as respectivas equações preconizadas pela NBR 6118 (2014) conforme a classe de resistência à compressão do concreto, ou seja, de 20 MPa a 50 MPa ou 55 MPa a 90 MPa. A Figura 36 ilustra esse comparativo.

Figura 36: Comparativo entre valores de módulo de elasticidade estimados e os verificados experimentalmente nos CAAs



Todos os CAAs, inclusive aqueles executados apenas com cimento, apresentaram valores de módulo de elasticidade inferiores comparados com os valores estimados segundo os preceitos da NBR 6118 (2014). Os percentuais de redução variaram de 19% a 24% para os CAAs com resistência à compressão inferior à 55 MPa e de 26% a 30% para os CAAs com resistência à compressão acima de 55 MPa. Tais diferenças verificadas nos CAAs podem estar relacionadas ao baixo consumo de agregado graúdo utilizado, além da menor dimensão máxima deste agregado (FELEKOĞLU; TÜRKEL; BARADAN, 2007). De qualquer modo, esta verificação indica a necessidade de cautela na adoção de valores estimados de módulo de elasticidade para CAAs.

Destaca-se também que uma segunda avaliação quanto à segregação foi efetuada para os concretos, porém no estado endurecido. Na Figura 37 estão apresentados corpos de prova após o rompimento,

onde é possível verificar a distribuição do agregado graúdo por toda a extensão das amostras.

Figura 37: Distribuição do agregado graúdo no concreto endurecido





## 5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

A partir das avaliações realizadas para o estado fresco, elevação adiabática de temperatura e estado endurecido dos CAAs com diferentes teores e cinzas volantes em substituição ao cimento, algumas conclusões podem ser abordadas, conforme exposto a seguir. Além disso, nesse capítulo, são apresentadas sugestões para trabalhos futuros que possam complementar o estudo sobre a influência da substituição de cimento por elevados teores de cinza volante em CAAs.

### 5.1 CONCLUSÕES

A substituição de cimento por teores elevados de cinza volante influenciou nos parâmetros de autoadensabilidade dos CAAs. As maiores influências foram verificadas para os teores de 50% e 60% de substituição, independentemente da cinza volante utilizada. Além disso, cada cinza volante avaliada atuou de maneira distinta, ou com diferente intensidade, em propriedades como fluidez e viscosidade plástica aparente dos CAAs. As correções que se fizeram necessárias nos CAAs, como para a redução da exsudação, resultaram da substituição de partículas finas e irregulares do cimento por partículas de maior diâmetro e possivelmente menos ásperas das cinzas volantes. Ademais, estima-se que a redução de partículas de maior finura, especialmente quando utilizada a CVA e CVB, afetou também, negativamente, na fluidez dos CAAs. Isso foi confirmado a partir da inserção do metacaulim nos CAAs com 50% e 60% de CVA e principalmente de CVB, além da utilização da CVC (moída). Nestes casos, foi possível reduzir o consumo de aditivo superplastificante para manter a fluidez desejada dos CAAs. Para um mesmo volume de água, de modo geral, a utilização de cinza volante diminuiu a viscosidade dos CAAs. No entanto, a CVA, quando inserida nas misturas, demandou os maiores ajustes para atendimento dos parâmetros de autoadensabilidade dos CAAs. Este comportamento indica que, além da finura, outros aspectos da cinza volante, como por exemplo a morfologia, interferem no comportamento do CAA no estado fresco. Deste modo, pode-se afirmar que o volume de finos ideal em CAAs com elevados teores de cinza volante, para se obter parâmetros de autoadensabilidade aceitáveis e/ou aplicáveis, é específico para cada cinza volante e para cada teor utilizado.

As substituições de cimento por teores iguais ou superiores a 40% de cinza volante reduziram a elevação adiabática de temperatura

dos CAAs, em comparação com o CAA feito apenas com cimento. A maior eficiência na redução da temperatura dos CAAs ocorreu para os teores de 60% de substituição de cimento. A presença do metacaulim influenciou na elevação da temperatura, visto que, nos CAAs 60A e 60B a temperatura elevou-se além daquela alcançada pelo CAA 60C. No entanto, o efeito do metacaulim, minimizado pelos elevados teores de cinza volante, não foi suficiente para elevar a temperatura destes CAAs ao mesmo nível do CAA de referência (100% de cimento). Deste modo, mesmo com as correções necessárias para o estado fresco dos CAAs, obteve-se benefícios na redução da elevação adiabática de temperatura, sendo este desempenho de grande valia para aplicação destas misturas em grandes blocos de fundação.

No estado endurecido, a utilização de cinza volante substituindo o cimento em teores volumétricos iguais ou superiores a 40%, diminui os valores de resistência à compressão. Estas reduções foram tanto maiores quanto maior o teor de substituição do cimento, independentemente da cinza volante utilizada, assim como ocorreram de forma mais significativa aos 28 dias. No entanto, tais reduções foram minimizadas com o aumento da idade de cura devido à reação pozolânica da cinza volante. Os acréscimos nos valores de resistência à compressão para as três cinzas volantes avaliadas, considerando o período de 28 para 91 dias, em geral, também foram maiores quanto maior o teor de cinza volante utilizado. Das cinzas volantes estudadas, a CVC apresentou os melhores resultados. Este desempenho foi atribuído principalmente à sua granulometria mais fina em comparação com as demais, visto que esta característica melhora as reações de hidratação e pozolânicas. Entretanto, para os CAAs com 60% de CVA e CVB, aos 91 dias, obteve-se valores médios de resistência à compressão de 45,6 e 54,2 MPa, respectivamente. Estes resultados indicam que é possível a utilização de CAAs com elevados teores de cinza volante em grandes blocos de fundação, mesmo com cinzas que não passaram por processos de moagem. Além disso, adotando como indicador de eficiência a razão entre a elevação adiabática de temperatura e a resistência à compressão dos CAAs ( $^{\circ}\text{C}/\text{MPa}$ ), este sistema apresenta-se realmente vantajoso para especificações técnicas de resistência à compressão em idades superiores a 28 dias, como por exemplo aos 91 dias ou em idades mais avançadas, relevando obviamente os efeitos da cinza volante utilizada.

Com relação ao módulo de elasticidade, os CAAs com elevados teores de cinza volante apresentaram valores inferiores comparados àqueles produzidos apenas com cimento. Da mesma forma como ocorreu com a resistência à compressão, as reduções foram mais

acentuadas aos 28 dias e mais elevadas quanto maior o teor de substituição do cimento, para as três cinzas testadas. Todavia, as reduções nos valores de módulo de elasticidade foram menores do que aquelas verificadas para a resistência à compressão, em todas as idades avaliadas. Isso indica que o menor consumo de cimento nos CAAs com cinza volante, e consequentemente a menor rigidez da pasta, tem maior influência na resistência à compressão. No entanto, a parcela de atuação referente à matriz cimentícia não é desprezível, visto que, a melhoria devido à atividade pozolânica das cinzas, com o aumento da idade de cura dos CAAs, favoreceu no acréscimo dos valores de módulo de elasticidade.

Destaca-se, no entanto, que os resultados encontrados para o estado endurecido dos CAAs referem-se à cura em 23°C, adotando-se, deste modo, o mesmo controle utilizado pelos projetistas e responsáveis técnicos. Uma vez que tanto as reações de hidratação quanto as pozolânicas antecipam-se com a elevação da temperatura, os resultados de resistência à compressão e módulo de elasticidade possivelmente seriam superiores, principalmente aos 28 dias, comparados aos verificados nesta pesquisa. Este fato chama a atenção de que resultados similares podem ser alcançados nos grandes blocos de fundação com menores consumos de cimento, ou seja, com teores mais elevados de cinza volante.

Comparando-se as três cinzas volantes avaliadas, e desconsiderando os custos para obtê-las, conclui-se que a CVC apresentou o melhor desempenho. No estado fresco, por dispensar a utilização de metacaulim e, no estado endurecido, por ter proporcionado aos CAAs os melhores resultados quanto à resistência à compressão em todos os teores e idades analisadas. Além disso, dos CAAs com 60% de cinza volante em substituição ao cimento, o CAA 60C foi o que apresentou a menor elevação adiabática de temperatura. Comparando-se a CVA e CVB, as quais não passaram por processos de moagem, a CVB parece ser a mais indicada para aplicação em CAAs. Apesar de ambas as cinzas terem apresentado aos CAAs necessidades de correções nos parâmetros de autoadensabilidade, a CVB possibilitou tais ajustes sem a necessidade do aumento do consumo de água, não interferindo negativamente nas propriedades dos CAAs no estado endurecido. Deste modo, considerando que a CVA e a CVB são provenientes de usinas termelétricas diferentes, conclui-se que a origem desta pozolana também deve ser ponderada, além da distribuição granulométrica, no momento da definição dos materiais para compor o CAA.

Como conclusão geral desta pesquisa, julga-se que a utilização de CAAs com elevados teores de cinza volante pode ser considerada viável para aplicação em grandes blocos de fundação. Neste caso, considera-se a possibilidade da redução na elevação adiabática de temperatura e a obtenção de valores de resistência à compressão e módulo de elasticidade aplicáveis, inclusive com melhorias em função do maior tempo de cura. Todavia, o estudo prévio da substituição do cimento por altos volumes de cinza volante é indispensável para verificação dos parâmetros de autoadensabilidade.

## 5.2 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Tendo-se em vista que esta pesquisa terá continuidade para complementar e melhorar a avaliação de desempenho de CAAs com elevados teores de cinza volante, para aplicação em grandes blocos de fundação, sugere-se os seguintes trabalhos:

- Produção de CAAs com elevados teores de cinza volante para verificação da influência nos parâmetros de autoadensabilidade devido a utilização de aditivos químicos modificadores de viscosidade, agregados miúdos e grãos de diferentes origens e distribuições granulométricas.
- Desenvolver CAAs com substituição do cimento por cinza volante em teores de 70% e 80%, por exemplo, avaliando parâmetros de autoadensabilidade, elevação adiabática de temperatura e propriedades no estado endurecido.
- Produzir CAAs com teores elevados de substituição do cimento por cinza volante em conjunto com outras adições, como a sílica ativa ou filler calcário, por exemplo, a fim de encontrar combinações que resultem em misturas com características apropriadas para utilização em grandes blocos de fundação.
- Avaliação do desenvolvimento da resistência à compressão e módulo de elasticidade de CAAs com elevados teores de cinza volante, ao longo do tempo, submetidos ao mesmo regime de cura das condições de elevação adiabática de temperatura. Deste modo, poder-se-ia verificar o comportamento destes CAAs quando em situações reais de aplicação, especificamente em grandes blocos de fundação.
- Desenvolver estudos relacionados aos conceitos de durabilidade em CAAs com elevados teores de cinza volante.



## REFERÊNCIAS

ACKER, P.; TORRENTI, J. M.; GUÉRINET, M. Controle da fissuração nas primeiras idades: condições de durabilidade das obras de concreto. In: OLLIVIER, J. P.; VICHOT, A. (Org.). **Durabilidade do concreto**: bases científicas para a formulação de concretos duráveis de acordo com o ambiente. Tradução: CASCUDO, O.; CARASEK, H. São Paulo: Ibracon, 2014. cap.6, p. 181-206. Tradução de: *LA DURABILITÉ DES BÉTONS: Bases scientifiques pour la formulation de bétons durables dans leur environnement.*

ALENCAR, R. S. A. **Dosagem de concreto autoadensável: produção de pré-fabricados**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2008, 179 p.

AMERICAN CONCRETE INSTITUTE. **ACI Concrete Terminology**. American Concrete Institute, Farmington Hills, 2013, 76 p.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING MATERIALS. **ASTM C 150**: Standard specification for Portland cement. ASTM International. United States, 2017.

\_\_\_\_\_. **ASTM C 618**: Standard specification for coal fly ash and raw or calcined natural pozzolan for use in concrete. ASTM International. United States, 2015.

\_\_\_\_\_. **ASTM C1611**: Standard test method for slump flow of self-consolidating concrete. ASTM International. United States, 2014.

\_\_\_\_\_. **ASTM C1621**: Standard test method for passing ability of self-consolidating concrete by J-ring. ASTM International. United States, 2014.

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

\_\_\_\_\_. **NBR 5739 - Concreto - Ensaios de compressão de corpos-de-prova cilíndricos**. Rio de Janeiro, 2007.

\_\_\_\_\_. **NBR 5752 - Materiais pozolânicos - Determinação do índice de desempenho com cimento Portland aos 28 dias.** Rio de Janeiro, 2014.

\_\_\_\_\_. **NBR 6118 - Projeto de estruturas de concreto - Procedimento.** Rio de Janeiro, 2014.

\_\_\_\_\_. **NBR 7211 - Agregados para concreto - Especificação.** Rio de Janeiro, 2009.

\_\_\_\_\_. **NBR 7214 - Areia normal para ensaio de cimento – Especificação.** Rio de Janeiro, 2015.

\_\_\_\_\_. **NBR 7215 - Cimento Portland - Determinação da resistência à compressão.** Rio de Janeiro, 1997.

\_\_\_\_\_. **NBR 8522 - Concreto - Determinação do módulo estático de elasticidade à compressão.** Rio de Janeiro, 2008.

\_\_\_\_\_. **NBR 9833 - Concreto fresco - Determinação da massa específica, do rendimento e do teor de ar pelo método gravimétrico.** Rio de Janeiro, 2009.

\_\_\_\_\_. **NBR 12653 - materiais pozolânicos - requisitos.** Rio de Janeiro. 2015.

\_\_\_\_\_. **NBR 15558 - Concreto - Determinação da exsudação.** Rio de Janeiro, 2008.

\_\_\_\_\_. **NBR 15823-1: Concreto autoadensável - classificação, controle e aceitação no estado fresco.** Rio de Janeiro, 2010.

\_\_\_\_\_. **NBR 15823-2: Concreto autoadensável - determinação do espalhamento e do tempo de escoamento - método do cone de Abrams.** Rio de Janeiro, 2010.

\_\_\_\_\_. **NBR 15823-3: Concreto autoadensável - Determinação da habilidade passante - método do anel J.** Rio de Janeiro, 2010.

\_\_\_\_\_. **NBR 15823-4: Concreto autoadensável - Determinação da habilidade passante - método da caixa L.** Rio de Janeiro, 2010.

\_\_\_\_\_. **NBR 15823-5: Concreto autoadensável - Determinação da viscosidade - método do funil V.** Rio de Janeiro, 2010.

\_\_\_\_\_. **NBR 15823-6: Concreto autoadensável - Determinação da resistência à segregação - Método da coluna de segregação.** Rio de Janeiro, 2012.

\_\_\_\_\_. **NBR 15894 -1 - Metacaulim para uso com cimento Portland em concreto, argamassa e pasta - Requisitos.** Rio de Janeiro, 2010.

\_\_\_\_\_. **NBR 15894 -2 - Metacaulim para uso com cimento Portland em concreto, argamassa e pasta - Determinação do índice de desempenho com cimento aos sete dias.** Rio de Janeiro, 2010.

\_\_\_\_\_. **NBR 15895 - Materiais pozolânicos - Determinação do teor de hidróxido de cálcio fixado - Método Chappelle modificado.** Rio de Janeiro, 2010.

\_\_\_\_\_. **NBR NM 18 - Cimento Portland - Análise química - Determinação de perda ao fogo.** Rio de Janeiro, 2012.

\_\_\_\_\_. **NBR NM 23 - Cimento Portland e outros materiais em pó - Determinação da massa específica.** Rio de Janeiro, 2001.

\_\_\_\_\_. **NBR NM 24 - Materiais pozolânicos - Determinação do teor de umidade.** Rio de Janeiro, 2003.

\_\_\_\_\_. **NBR NM 46 - Agregados - Determinação do material fino que passa através da peneira 75 um, por lavagem.** Rio de Janeiro, 2003.

\_\_\_\_\_. **NBR NM 52 - Agregado miúdo - Determinação da massa específica e massa específica aparente.** Rio de Janeiro, 2009.

\_\_\_\_\_. **NBR NM 53 - Agregado graúdo - Determinação da massa específica, massa específica aparente e absorção de água.** Rio de Janeiro, 2009.

\_\_\_\_\_. **NBR NM 248 - Agregados - Determinação da composição granulométrica.** Rio de Janeiro, 2003.

ATIS, C. D. Heat evolution of high-volume fly ash concrete. **Cement and Concrete Research**, v. 32, p. 751-756, 2002.

ATIS, C. D. Strength properties of high-volume fly ash roller compacted and workable concrete, and influence of curing condition. **Cement and Concrete Research**, v. 35, p. 1112-1121, 2005.

BAI, J; WILD, S. Investigation of the temperature change and heat evolution of mortar incorporating PFA and metakaolin. **Cement and Concrete Composites**, v. 24, p. 201-209, 2002.

BENTZ, D. P.; FERRARIS, C. F. Rheology and setting of high volume fly ash mixtures. **Cement and Concrete Composites**, v. 32, p. 265-270, 2010.

BERRY, E. E.; HEMMINGS, R. T.; CORNELIUS, B. J. Mechanisms of hydration reactions in high volume fly ash pastes and mortars. **Cement and Concrete Composites**, v. 12, p. 253-261, 1990.

BOUZOUBAÂ, N; LACHEMI, M. Self-compacting concrete incorporating high volumes of class F fly ash: Preliminary results. **Cement and Concrete Research**, v. 31, p. 413-420, 2001.

BOUZOUBAÂ, N.; ZHANG, M. H.; MALHOTRA, V. M. Mechanical properties and durability of concrete made with high-volume fly ash blended cements using a coarse fly ash. **Cement and Concrete Research**, v. 31, p. 1393-1402, 2001.

CARLES-GIBERGUES, A.; HORNAIN, H. A durabilidade do concreto frente às reações expansivas de origem endógena. In: OLLIVIER, Jean-Pierre; VICHOT, Angélique (Org.). **Durabilidade do concreto: bases científicas para a formulação de concretos duráveis de acordo com o ambiente**. Tradução: CASCUDO, O.; CARASEK, H. São Paulo: Ibracon, 2014. cap.10, p. 327-432. Tradução de: *LA DURABILITÉ DES BÉTONS: Bases scientifiques pour la formulation de bétons durables dans leur environnement*.

CELIK, K.; MERAL, C.; GURSEL, A. P.; MEHTA, P. K.; HORVATH, A.; MONTEIRO, P. J. M. Mechanical properties, durability, and life-cycle assessment of self-consolidating concrete mixtures made with blended portland cements containing fly ash and limestone powder.

**Cement and Concrete Composites**, v. 56, p. 59-72, 2015.

CELIK, K.; MERAL, C.; MANCIO, M.; MEHTA, P. K.; MONTEIRO, P. J. M. A comparative study of self-consolidating concretes incorporating high-volume natural pozzolan or high-volume fly ash.

**Construction and Building Materials**, v. 67, p. 14-19, 2014.

CHINDAPRASIRT, P.; JATURAPITAKKUL, C.; SINSIRI, T. Effect of fly ash fineness on microstructure of blended cement paste.

**Construction and Building Materials**, v. 21, p. 1534-1541, 2007.

CINCOTTO, M. A. Reações de hidratação e pozolânicas. In: ISAIA, G. C. (Org.). **Concreto: ciência e tecnologia**. 1 ed. São Paulo: Ibracon, 2011. cap. 11, p. 381-413.

COUNCIL ON TALL BUILDINGS AND URBAN HABITAT. **The skyscraper center**. 2016. Disponível em:

<<http://www.skyscrapercenter.com>>. Acesso em: 26 abr. 2016.

DAL MOLIN, D. C. C. Adições minerais. In: ISAIA, G. C. (Org.).

**Concreto: ciência e tecnologia**. 1 ed. São Paulo: Ibracon, 2011. cap. 8, p. 261-309.

DAMINELI, B. L.; KEMEID, F. M.; AGUIAR, P. S.; JOHN, V. M.

Measuring the eco-efficiency of cement use. **Cement and Concrete Composites**, v. 32, p. 555-562, 2010.

DE LA VARGA, I.; CASTRO, J.; BENTZ, D.; WEISS, J. Application of internal curing for mixtures containing high volumes of fly ash.

**Cement and Concrete Composites**, v. 34, p. 1001-1008, 2012.

DESCHNER, F.; LOTHENBACH, B.; WINNEFELD, F.; NEUBAUER, J. Effect of temperature on the hydration of Portland cement blended with siliceous fly ash. **Cement and Concrete**

**Research**, v. 52, p. 169-181, 2013.

DINAKAR, P.; BABU, K. G.; SANTHANAM, M. Durability properties of high volume fly ash self compacting concretes. **Cement and Concrete Composites**, v. 30, p. 880-886, 2008.

DOMONE, P. L. A review of the hardened mechanical properties of self-compacting concrete. **Cement and Concrete Composites**. v. 29, p. 1-12, 2007.

ESCALANTE-GARCÍA, J. I.; SHARP, J. H. The microstructure and mechanical properties of blended cements hydrated at various temperatures. **Cement and Concrete Research**, v. 31, p. 695-702, 2001.

EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARDIZATION. **EN 206-9: Concrete Part 9: Additional Rules for Self-compacting Concrete (SCC)**. Brussels, 2010.

\_\_\_\_\_. **EN 12350-11: Testing fresh concrete - Part 11: Self-compacting concrete - Sieve segregation test**. Brussels, 2010.

\_\_\_\_\_. **EN 12350-12: Testing fresh concrete - Part 12: Self-compacting concrete – J ring test**. Brussels, 2010.

EFNARC. **Specification and guidelines for self-compacting concrete**. Reino Unido, 2002, 32 p.

\_\_\_\_\_. **The European Guidelines for self-compacting concrete: specification, production and use**. Reino Unido, 2005, 63 p.

FARIA, E. F. **Concretos autoadensáveis de alto desempenho com catalisador residual do craqueamento catalítico fluido (Ecat) de refinarias de petróleo**. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) - Universidade Federal do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro, 2012, 222 p.

FELDMAN, R. F.; CARETTE, G. G.; MALHOTRA, V. M. Studies on mechanics of development of physical and mechanical properties of high-volume fly ash-cement pastes. **Cement and Concrete Composites**, v. 12, p. 245-251, 1990.

FELEKOĞLU, B.; TÜRKEL, S.; BARADAN, B. Effect of water/cement ratio on the fresh and hardened properties of self-compacting concrete. **Building and Environment**, v. 42, p. 1795-1802, 2007.

FOCHS, R. G. **Estudo comparativo entre métodos de dosagem de concreto autoadensável**. Dissertação (Mestrado em Engenharia e Tecnologia de Materiais) - Pontifícia Universidade Católica do Rio Grande do Sul. Porto Alegre, 2011, 179 p.

FU, X.; WANG, Z.; TAO, W.; YANG, C.; HOU, W.; DONG, Y.; WU, X. Studies on blended cement with a large amount of fly ash. **Cement and Concrete Research**. v. 32, p. 1153-1159, 2002.

FURNAS, Equipe de: Laboratório de Concreto. **Concretos massa, estrutural, projetado e compactado com rolo: ensaios e propriedades**. ANDRADE, W. P. (Ed.). São Paulo: PINI, 1997. 837 p.

GADJA, J.; VANGEEM, M. Controlling temperatures in mass concrete. **Concrete International**, p. 59-62, 2002.

GIACCIO, G. M.; MALHOTRA, V. M. Concrete Incorporating High Volumes of ASTM Class F Fly Ash. **Cement, Concrete, and Aggregates**, v. 10, p. 88-95, 1988.

GOMES, P. C. C.; BARROS, A. R. **Métodos de dosagem de concreto autoadensável**. São Paulo: Pini, 2009. 165 p.

GRACE CONSTRUCTION PRODUCTS. **Tec Flow**: aditivo superplastificante para concreto. Ficha técnica. 2015. Disponível em: <<https://gcpat.com/construction/pt-br/soluções-para-concreto/TEC-FLOW>>. Acesso em: 21 mar. 2016.

GRANATA, M. F. Pumice powder as filler of self-compacting concrete. **Construction and Building Materials**, v. 96, p. 581-590, 2015.

GÜNEYISI, E.; GESOĞLU, M. Properties of self-compacting mortars with binary and ternary cementitious blends of fly ash and metakaolin. **Materials and Structures**, v. 41, p. 1519-1531, 2008.

GÜNEYISI, E.; GESOĞLU, M.; AL-GOODY, A.; İPEK, S. Fresh and rheological behavior of nano-silica and fly ash blended self-compacting concrete. **Construction and Building Materials**, v. 95, p. 29-44, 2015.

GÜNEYISI, E.; GESOĞLU, M.; ÖZBAY, E. Strength and drying shrinkage properties of self-compacting concretes incorporating multi-system blended mineral admixtures. **Construction and Building Materials**, v. 24, p. 1878-1887, 2010.

HANEHARA, S.; TOMOSAWA, F.; KOBAYAKAWA, M.; HWANG, K. Effects of water/powder ratio, mixing ratio of fly ash, and curing temperature on pozzolanic reaction of fly ash in cement paste. **Cement and Concrete Research**, v. 31, p. 31-39, 2001.

HANSEN, T. C. Long-term strength of high fly ash concretes. **Cement and Concrete Research**, v. 20, p. 193-196, 1990.

HARTMANN, C.; ARA, J.; SILVA, D.; BENINI, H. Aditivos químicos para concretos e cimentos. In: ISAIA, G. C. (Org.). **Concreto: ciência e tecnologia**. 1 ed. São Paulo: Ibracon, 2011. cap. 10, p. 347-380.

HERRERA, A. D.; JUÁREZ, C. A.; VALDEZ, P.; BENTZ, D. P. Evaluation of sustainable high-volume fly ash concretes. **Cement and Concrete Composites**. v. 33, p. 39-45, 2011.

HOPPE FILHO, J. **Sistemas cimento, cinza volante e cal hidratada: mecanismos de hidratação, microestrutura e carbonatação de concreto**. Tese (Doutorado em Engenharia) - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. São Paulo, 2008, 247 p.

HUANG, C.H.; LIN, S.K.; CHANG, C.S.; CHEN, H.J. Mix proportions and mechanical properties of concrete containing very high-volume of Class F fly ash. **Construction and Building Materials**, v. 46, p. 71-78, 2013.

JUNCKES, R. **Influência da adição de cinza volante na elevação de temperatura de concretos aplicados em blocos de fundação**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis, 2015, 162 p.

KAYALI, O.; AHMED, M. S. Assessment of high volume replacement fly ash concrete - Concept of performance index. **Construction and Building Materials**, v. 39, p. 71-76, 2013.

KHATIB, J. M. Performance of self-compacting concrete containing fly ash. **Construction and Building Materials**, v. 22, p. 1963-1971, 2008.

LAM, L; WONG, Y. L; POON, C. S. Degree of hydration and gel/space ratio of high-volume fly ash/cement systems. **Cement and Concrete Research**, v. 30, p. 747-756, 2000.

LIU, M. Self-compacting concrete with different levels of pulverized fuel ash. **Construction and Building Materials**, v. 24, p. 1245-1252, 2010.

LOUZAS, R. Com concretagem ininterrupta de 16,2 mil m<sup>3</sup>, arranha-céu em Los Angeles bate recorde mundial. **Téchne: PINI**, 2014. Disponível em: <<http://techne.pini.com.br/engenharia-civil/obras/com-concretagem-ininterrupta-de-162-mil-m-arranha-ceu-em-los-309639-1.aspx>>. Acesso em: 26 abr. 2016.

MADANDOUST, R.; MOUSAVI, S. Y. Fresh and hardened properties of self-compacting concrete containing metakaolin. **Construction and Building Materials**, v. 35, p. 752-760, 2012.

MALHOTRA, V. M. Durability of concrete incorporating high-volume of low-calcium (ASTM Class F) fly ash. **Cement and Concrete Composites**, v. 12, p. 271-277, 1990.

MARQUES, A. C. **Concreto autoadensável**: caracterização da evolução das propriedades mecânicas e estudo da sua deformabilidade por solitação mecânica, retração e fluência. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. São Paulo, 2011, 175 p.

MARQUES FILHO, J. Concreto massa e concreto compactado com rolo. In: ISAIA, G. C. (Org.). **Concreto**: ciência e tecnologia. 1 ed. São Paulo: Ibracon, 2011. cap. 39, p. 1399-1447.

MEHTA, P. K.; MONTEIRO, P. J. M. **Concreto**: microestrutura, propriedades e materiais. 2 ed. São Paulo: IBRACON, 2014. 751 p.

- MELO, K. A. **Contribuição à dosagem de concreto autoadensável com adição de filler calcário**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis, 2005, 184 p.
- MENGXIAO, S.; QIANG, W.; ZHIKAI, Z. Comparison of the properties between high-volume fly ash concrete and high-volume steel slag concrete under temperature matching curing condition. **Construction and Building Materials**, v. 98, p. 649-655, 2015.
- METACAULIM do Brasil. **Metacaulim HP Ultra**: ficha técnica. Disponível em: <<http://www.metacaulim.com.br/impermeabilizantes-metacaulim-hp-ultra.html>>. Acesso em: 12 out 2016.
- NARMLUK, M.; NAWA, T. Effect of fly ash on the kinetics of Portland cement hydration at different curing temperaturas. **Cement and Concrete Research**, v. 41, p. 579-589, 2011.
- NEHDI, M.; PARDHAN, M.; KOSHOWSKI, S. Durability of self-consolidating concrete incorporating high-volume replacement composite cements. **Cement and Concrete Research**. v. 34, p. 2103-2112, 2004.
- NEVILLE, A. M; BROOKS, J. J. **Tecnologia do concreto**. 2 ed. Porto Alegre: Bookman, 2013. 448 p.
- NEVILLE, A. M. **Propriedades do concreto**. 5 ed. São Paulo: Bookman, 2016. 912 p.
- NG, S.; JUSTNES, H. Influence of plasticizers on the rheology and early heat of hydration of blended cements with high content of fly ash. **Cement and Concrete Composites**, v. 65, p. 41-54, 2016.
- OKAMURA, H.; OUCHI, M. Self-compacting concrete. **Journal of Advanced Concrete Technology**, v. 1, n. 1, p. 5-15, 2003.
- PARRA, C.; VALCUENDE, M.; GÓMEZ, F. Splitting tensile strength and modulus of elasticity of self-compacting concrete. **Construction and Building Materials**, v. 25, p. 201-207, 2011.

PEREIRA, T. A. C. **Concreto autoadensável, de alta resistência, com baixo consumo de cimento Portland e com adição de fibras de lã de rocha ou poliamida**. Dissertação (Mestrado em Engenharia de estruturas) – Escola de Engenharia de São Carlos, da Universidade de São Paulo. São Carlos, 2010, 281 p.

POON, C. S.; LAM, L.; WONG, Y. L. A study on high strength concrete prepared with large volumes of low calcium fly ash. **Cement and Concrete Research**, v. 30, p. 447-455, 2000.

PRUDÊNCIO JR., L. R. **Tecnologia do concreto: concreto autoadensável/concreto massa**. Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis, 2016. Notas de aula. 56 slides.

RAMEZANIANPOUR, A. A.; MALHOTRA, V. M. Effect of curing on the compressive strength, resistance to chloride-ion penetration and porosity of concretes incorporating slag, fly ash or silica fume. **Cement and Concrete Composites**, v. 17, p. 125-133, 1995.

RASHAD, A. M. A brief on high-volume Class F fly ash as cement replacement – A guide for Civil Engineer. **International Journal of Sustainable Built Environment**, v. 4, p. 278-306, 2015.

REPETTE, W. L. Concreto autoadensável. In: ISAIA, G. C. (Org.). **Concreto: ciência e tecnologia**. 1 ed. São Paulo: Ibracon, 2011. cap. 48, p. 1769-1806.

RIVERA, F.; MARTÍNEZ, P.; CASTRO, J.; LÓPEZ, M. Massive Volume Fly-Ash Concrete: A More Sustainable Material with Fly Ash Replacing Cement and Aggregates. **Cement and Concrete Composites**, v. 63, p. 104-112, 2015.

ROMANO, R. C. O.; CARDOSO, F. A.; PILLEGGI, R. G. Propriedades do concreto no estado fresco. In: ISAIA, G. C. (Org.). **Concreto: ciência e tecnologia**. 1 ed. São Paulo: Ibracon, 2011. cap. 13, p. 453-500.

ŞAHMARAN, M.; CHRISTIANTO, H. A.; YAMAN, İ. Ö. The effect of chemical admixtures and mineral additives on the properties of self-compacting mortars. **Cement and Concrete Composites**, v. 28, p. 432-440, 2006.

SALUM, P. L.; GRAEFF, E.; MULLER, G. M.; SCHANKOSKI, R. A.; PRUDÊNCIO JR., L. R. Estudos prévios para execução de bloco de coroamento de grande volume. In: 56° CONGRESSO BRASILEIRO DO CONCRETO, 2014. **Anais...Natal/RN: IBRACON**, 2014.

SALUM, P. L. **Efeito da elevação de temperatura sobre a resistência à compressão de concretos massa com diferentes teores de cinza volante**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis, 2016, 164 p.

SANTOS, S. B.; BITTENCOURT, R. M.; GRAÇA, N. G. Efeitos da temperatura sobre o concreto. In: ISAIA, G. C. (Org.). **Concreto: ciência e tecnologia**. 1 ed. São Paulo: Ibracon, 2011. cap. 20, p. 705-731.

SANTOS, I. M. R.; CHRISTÓFOLLI, J. L.; ESTEVES, J. S.; ROSA, R. Monitoramento de temperatura – Bloco de fundação Edifício Yachthouse – Balneário Camboriu/SC. In: 57° CONGRESSO BRASILEIRO DO CONCRETO, 2015. **Anais...Bonito/MS: IBRACON**, 2015.

SFIKAS, I. P.; BADOGIANNIS, E. G.; TREZOS, K. G. Rheology and mechanical characteristics of self-compacting concrete mixtures containing metakaolin. **Construction and Building Materials**, v. 64, p. 121-129, 2014.

SHAIKH, F. U. A.; SUPIT, S. W. M. Compressive strength and durability properties of high volume fly ash (HVFA) concretes containing ultrafine fly ash (UFFA). **Construction and Building Materials**, v. 82, p. 192-205, 2015.

SIDDIQUE, R. Performance characteristics of high-volume Class F fly ash concrete. **Cement and Concrete Research**, v. 34, p. 487-493, 2004.

SILVA, M. O. B. **Produção do concreto auto-adensável (CAA) com a utilização de materiais da região de Belém-PA**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade Federal do Pará. Belém, 2008, 167 p.

SILVA, W. R. L.; ŠMILAUER, V.; ŠTEMBERK, P. Upscaling semi-adiabatic measurements for simulating temperature evolution of mass concrete structures. **Materials and Structures**, v. 48, p. 1031-1041, 2015.

SIVASUNDARAM, V.; CARETTE, G. G.; MALHOTRA, V. M. Long-Term Strength Development of High-Volume Fly Ash Concrete. **Cement and Concrete Composites**, v. 12, p. 263-270, 1990.

SNELSON, D. G.; WILD, S.; O'FARRELL, M. Heat of hydration of Portland Cement–Metakaolin–Fly ash (PC–MK–PFA) blends. **Cement and Concrete Research**, v. 38, p. 832-840, 2008.

SUA-IAM, G.; MAKUL, N. Utilization of high volumes of unprocessed lignite-coal fly ash and rice husk ash in self-consolidating concrete. **Journal of Cleaner Production**, v. 78, p. 184-194, 2014.

TUTIKIAN, B. F. **Método para dosagem de concretos autoadensáveis**. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre, 2004, 148 p.

TUTIKIAN, B. F.; DAL MOLIN, D. C. **Concreto autoadensável**. 2 ed. São Paulo: PINI, 2015. 144 p.

WANG, X.Y.; PARK, K.B. Analysis of compressive strength development of concrete containing high volume fly ash. **Construction and Building Materials**, v. 98, p. 810-819, 2015.

WEERDT, K. D.; BEN HAHA, M.; LE SAOUT, G.; KJELLSSEN, K. O.; JUSTNES, H.; LOTHENBACH, B. The effect of temperature on the hydration of composite cements containing limestone powder and fly ash. RILEM. **Materials and Structures**, v. 45, p. 1101-1114, 2012.

WEIDMANN, D. F. **Contribuição ao estudo da influência da forma e da composição granulométrica de agregados miúdos de britagem nas propriedades do concreto de cimento Portland.** Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis, 2008, 273 p.

YAZICI, H. The effect of silica fume and high-volume Class C fly ash on mechanical properties, chloride penetration and freeze–thaw resistance of self-compacting concrete. **Construction and Building Materials**, v. 22, p. 456-462, 2008.

YOSHITAKE, I.; KOMUREA, H.; NASSIFB, A. Y.; FUKUMOTOC, S. Tensile properties of high volume fly-ash (HVFA) concrete with limestone aggregate. **Construction and Building Materials**, v. 49, p. 101-109, 2013.

YOSHITAKE, B. I.; WONG, H.; ISHIDA, T.; NASSIF, A. Y. Thermal stress of high volume fly-ash (HVFA) concrete made with limestone aggregate. **Construction and Building Materials**, v. 71, p. 216-225, 2014.

## APÊNDICES



## APÊNDICE A – ENSAIOS DE CARACTERIZAÇÃO DE CAAs NO ESTADO FRESCO

A seguir estão abordados métodos de ensaios para caracterização de CAAs no estado fresco, além de comentários referentes ao assunto. Ressalta-se que as bibliografias abordadas estão listadas nas referências bibliográficas deste documento.

### **Habilidade de preenchimento**

A habilidade de preenchimento ou fluidez do CAA em fluxo livre é verificada através do ensaio de espalhamento (*slump flow*) (NBR 15823-2, 2010). O resultado de espalhamento é o principal parâmetro para definir se a consistência do CAA atende ao desejado. Sendo assim, este ensaio é normalmente especificado em todas as aplicações (GÜNEYISI *et al.*, 2015).

A realização do ensaio de espalhamento é simples e ocorre com a utilização de uma chapa metálica com dimensões mínimas de 900 x 900 mm e de um cone de Abrams. O tronco de cone é colocado e mantido fixo sobre uma marcação de 200 mm no centro da placa. O preenchimento com concreto deve ser feito de forma contínua e sem adensamento. Após colocação e nivelamento do concreto ao topo do molde, ergue-se o cone para permitir que o concreto flua livremente. O resultado é o espalhamento (SF) do concreto, obtido através da média aritmética de duas verificações perpendiculares do diâmetro de espalhamento (NBR 15823-2, 2010).

O CAA é classificado em função de classes de espalhamento, definidas pelo tipo de aplicação, conforme segue:

- SF 1, espalhamento de 550 mm a 650 mm: aplicação em estrutura não armada ou com baixa taxa de armadura, em CAA bombeado e concretagem com curta distância de espalhamento horizontal;
- SF 2, espalhamento de 660 mm a 750 mm: adequada para a maioria das aplicações;
- SF 3, espalhamento de 760 mm a 850 mm: aplicação em estruturas com elevada densidade de armadura, com utilização de agregado graúdo menor que 12,5 mm (NBR 15823-1, 2010).

Tutikian e Dal Molin (2015) comentam que valores de espalhamento baixos representam concretos pouco fluidos, que devem ser corrigidos com água ou aditivo superplastificante. Opostamente, concretos com medidas de espalhamento elevadas devem ser ajustados para aumentar a coesão, visto que em função da elevada fluidez podem apresentar segregação. De acordo com Liu (2010), o valor de espalhamento está de certa forma relacionado com a tensão de escoamento do concreto.

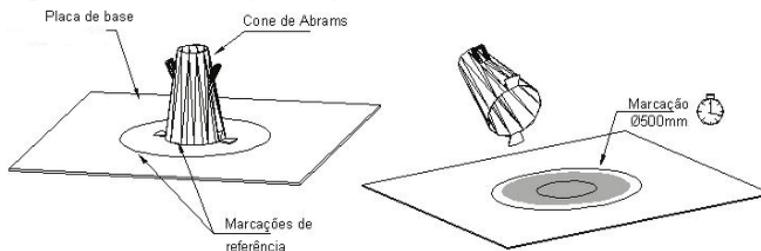
Através do espalhamento, outros parâmetros de caracterização do CAA podem ser obtidos, como tempo de escoamento  $T_{500}$ , tempo de espalhamento final, além da verificação visual da distribuição do agregado graúdo, segregação e exsudação (MARQUES, 2011).

### Viscosidade plástica aparente

A viscosidade representa a resistência de um material ao escoamento uma vez que seu fluxo tenha iniciado (EFNARC, 2005). A verificação da viscosidade plástica aparente é relevante para aplicações que contenham elevada densidade de armadura ou quando se busca um bom acabamento da superfície do elemento concretado. A avaliação deste parâmetro pode ser realizada através do ensaio de funil V ou através da verificação do tempo de escoamento  $T_{500}$  (EFNARC, 2005; NBR 15823-1, 2010).

De acordo com Tutikian e Dal Molin (2015), tempo de espalhamento  $T_{500}$  é uma variação do *slump flow*, visto que o método de execução e equipamentos são os mesmos. O teste é realizado simultaneamente ao ensaio de verificação do espalhamento, onde verifica-se o tempo de escoamento do concreto desde o instante da elevação do cone até o momento em que o concreto atingir uma marcação de 500 mm na placa base (Figura 1).

Figura 1: Ensaio de tempo de espalhamento  $T_{500}$

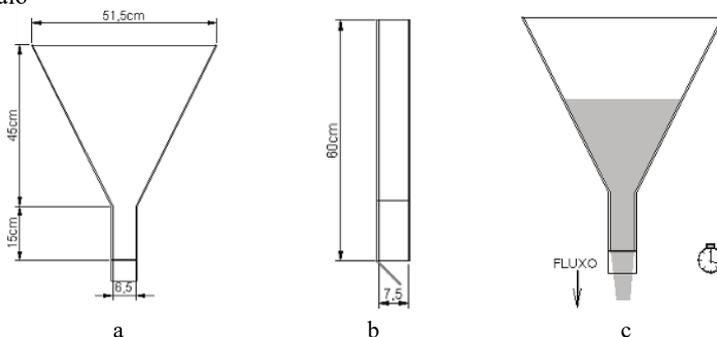


Fonte: NBR 15823-2 (2010).

CAA com espalhamento inicial rápido, de curta duração, apresenta baixa viscosidade. Ao contrário, CAA com alta viscosidade move-se de forma lenta e progressiva (EFNARC, 2005; NBR 15823-1, 2010). O ensaio do funil V também está vinculado à viscosidade aparente do concreto, porém, em fluxo confinado, a partir do registro do tempo que o concreto leva para escoar pelo funil, sendo que, quanto maior o tempo de escoamento, maior a viscosidade plástica da mistura (ALENCAR, 2008). O ensaio no funil V refere-se ao fluxo do concreto considerando os atritos internos e externos. Como a seção do funil diminui, o atrito entre pasta e agregados aumenta (SUA-IAM; MAKUL, 2014).

O funil V tem suas dimensões prescritas pela NBR 15823-5 (2010), conforme mostrado na Figura 2. O método de ensaio consiste em preenchê-lo completamente com o CAA, sem qualquer tipo de adensamento e, após um tempo máximo de 30 s, deve-se abrir a comporta situada na extremidade inferior do funil, cronometrando o tempo necessário para o escoamento de todo o volume de concreto.

Figura 2: Dimensões do funil V: a) vista frontal; b) vista lateral; c) execução do ensaio



Fonte: NBR 15823-5 (2010).

As classes de viscosidade plástica do CAA dividem-se em:

- VS 1/VF 1, para escoamento  $T_{500} \leq 2$  s, e escoamento no funil V < 9 s: adequado para aplicação em elementos estruturais com alta densidade de armadura, mas com exigência do controle de segregação e exsudação;

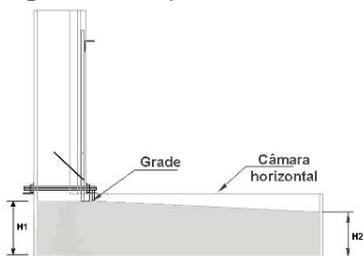
- VS 2/VF 2, para escoamento  $T_{500} > 2$  s, e escoamento no funil V entre 9 s a 25 s: apropriado para a maioria das aplicações, apresenta menor pressão nas formas e maior resistência à segregação devido ao efeito tixotrópico. Porém, resultados negativos podem ser encontrados em acabamentos da superfície, preenchimento de cantos e sensibilidade a interrupções (NBR 15823-1, 2010).

## Habilidade passante

Para definição da habilidade passante, é imprescindível considerar a geometria e a densidade da armadura, a habilidade de preenchimento do concreto e o tamanho máximo do agregado (EFNARC, 2005).

A determinação da habilidade passante, de acordo com NBR 15823-4 (2010), é realizada no ensaio da caixa L, que possui seção retangular com um compartimento vertical e um horizontal. A caixa é provida de um dispositivo em forma de grade com duas ou três barras metálicas lisas de diâmetro 12,5 mm, com espaçamento equidistante entre as mesmas. A câmara vertical da caixa, que é isolada da câmara horizontal, deve ser preenchida com concreto, de maneira contínua e sem qualquer forma de adensamento. Após 30 s a 60 s do preenchimento, deve-se realizar a abertura da comporta que separa a seção vertical da horizontal, permitindo assim que o concreto escoe, passando entre as barras metálicas. Finalizado o escoamento, verifica-se o valor de  $H_1$  como sendo a altura do concreto na extremidade da coluna vertical e  $H_2$  referente à altura do concreto na extremidade da câmara horizontal da caixa, conforme Figura 3. A habilidade passante é a razão entre  $H_2/H_1$ .

Figura 3: Execução do ensaio caixa L



Fonte: NBR 15823-4 (2010).

As classes de habilidade passante (PL) para CAA são apresentadas na Tabela 1.

Tabela 1: Classes de habilidade passante para CAA em função de sua aplicação

Classe de habilidade passante	Caixa L ( $H_2/H_1$ )	Aplicação
PL 1	$\geq 0,80$ , com duas barras de aço	Elementos estruturais com espaçamentos de armadura de 80 a 100 mm.
PL 2	$\geq 0,80$ , com três barras de aço	Adequado para a maioria das aplicações correntes. Elementos estruturais com espaçamentos na armadura de 60 a 80 mm.*

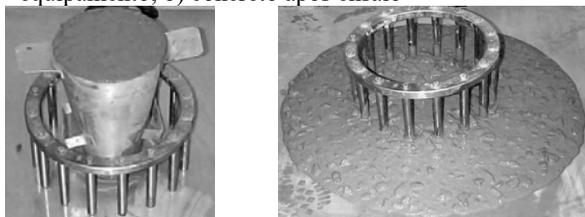
\* Em estruturas complexas com espaçamento de armadura menor que 60 mm, ensaios específicos podem ser necessários.

Fonte: adaptada de NBR 15823-1 (2010).

O acúmulo dos agregados ao passar pelas barras de restrição indica que o concreto não tem coesão suficiente, tampouco resistência ao bloqueio para movimentar-se de forma homogênea em torno de obstáculos. As causas podem ser relativas à falta de argamassa, argamassa com viscosidade inferior a necessária, ou agregados com partículas maiores aos espaços dos obstáculos que devem ultrapassar (REPETTE, 2011).

A avaliação da habilidade passante pode ser também realizada através do ensaio de anel J. A ASTM C 1621 (2014) descreve os procedimentos do método, que se resumem em realizar o ensaio de espalhamento do CAA sem e com a utilização do anel J, conforme Figura 4. A orientação do cone de Abrams para o teste com anel J e para o ensaio de espalhamento deve ser a mesma. A diferença entre os valores de espalhamento é um indicador da habilidade passante do CAA. Se o resultado for inferior a 25 mm, indica boa habilidade passante, e se for maior do que 50 mm, indica baixa habilidade de passagem.

Figura 4: Ensaio de habilidade passante com anel J: a) posicionamento do equipamento; b) concreto após ensaio



(a)

(b)

Fonte: ASTM C 1621 (2014).

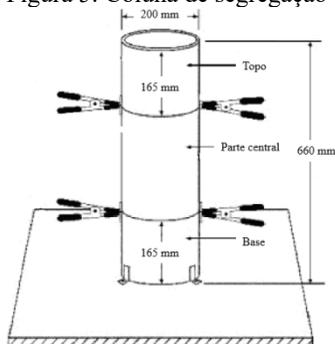
A NBR 15823-3 (2010) apresenta o método de forma semelhante, entretanto condiciona o posicionamento do cone de Abrams na posição invertida. O resultado é a diferença entre o valor de espalhamento realizado conforme NBR 15823-2 (2010) e o valor obtido com a utilização do anel J. As diferenças nos valores de espalhamento recomendadas neste caso são de 0 mm a 25 mm, para concretos adequados para a maioria das aplicações correntes, e de 25 mm a 50 mm, para elementos estruturais com armaduras espaçadas entre 80 mm a 100 mm.

Outra possibilidade de verificar a habilidade passante do CAA utilizando este equipamento é apresentada pela EN 12350-12 (2010) onde, após cessar o espalhamento do concreto, mede-se a altura da parte central do concreto e mais quatro alturas externas ao anel J, sendo ambas alinhadas ao nível superior do anel J. A habilidade passante corresponde ao valor encontrado pela diferença entre a média das quatro alturas externas e a altura interna do concreto. A EN 206-9 (2010) limita os resultados deste ensaio ao máximo de 10 mm.

### **Resistência à segregação**

A segregação no CAA pode ser dinâmica, que ocorre durante o fluxo do material nos processos de transporte, lançamento e preenchimento, ou pode ser estática, onde o material é submetido as ações da gravidade e do tempo, causando a sedimentação das partículas quando em repouso (ROMANO; CARDOSO; PILEGGI, 2011). De acordo com Repette (2011), a segregação dinâmica influencia, além do escoamento, na capacidade de passagem por restrições e está vinculada à falta de coesão da mistura. O ensaio para verificação da ocorrência de segregação preconizado pela NBR 15823-6 (2012) é realizado em um tubo de PVC de 200 mm de diâmetro e 660 mm de altura, dividido em 3 partes, sendo o topo e a base com altura de 165 mm e a parte central com altura de 330 mm. Estas seções devem ser fixadas e o conjunto apoiado sobre uma base plana, conforme ilustrado na Figura 5.

Figura 5: Coluna de segregação



Fonte: NBR 15823-6 (2012).

Na sequência, o tubo é preenchido com concreto sem qualquer tipo de adensamento. Passados 20 minutos após a moldagem, retira-se as porções de concreto do topo e da base do tubo, estas devem ser lavadas na peneira com abertura de 5 mm removendo completamente a argamassa do entorno dos agregados graúdos. Após a lavagem, os agregados devem ser secos com tolhas ou papel absorvente para alcançar a condição saturado superfície seca. Por fim, os agregados são pesados obtendo-se os respectivos valores da porção retirada na base e no topo da coluna. A resistência à segregação é a relação percentual entre a diferença da quantidade de agregado graúdo retirado da base e do topo da coluna de segregação e a média destas duas porções (NBR 15823-6, 2012). As classes de resistência à segregação estão indicadas na Tabela 2.

Tabela 2: Classes de resistência à segregação do CAA em função de sua aplicação

Classe de resistência à segregação	Coluna de segregação (%)	Distância a ser percorrida (m)	Espaçamento entre armaduras (mm)
SR 1	≤ 20	< 5	> 80
SR 2	≤ 15	> 5	> 80
		< 5	< 80

Fonte: adaptada de NBR 15823-1 (2010).

Avaliações visuais para verificar qualitativamente a estabilidade do CAA, também podem ser realizadas. A ASTM C1611 (2014) apresenta uma metodologia de avaliação que ocorre durante a realização do ensaio de espalhamento. Os valores de índices de estabilidade visual,

(*Visual Stability Index*), assim como os parâmetros para classificação quanto segregação e exsudação, são classificados da seguinte forma:

- altamente estável (valor 0, zero), nenhuma evidência de segregação e exsudação;
- estável (valor 1), nenhuma evidência de segregação e uma leve exsudação observada através de um brilho sobre a massa de concreto;
- instável (valor 2), pequena borda de argamassa ao redor do concreto,  $\leq 10$  mm, e/ou acúmulo de agregados no concreto;
- altamente instável (valor 3), verificação clara de exsudação com a existência de uma grande borda de argamassa em torno da mistura,  $>10$  mm, e/ou grande acúmulo de agregados no centro da mistura de concreto.

A verificação de acúmulo do agregado no centro da mistura espalhada indica não só a propensão à segregação, mas também ao bloqueio na passagem por restrições. Além disso, se constatada a presença de água em excesso nas bordas do concreto espalhado, possivelmente o mesmo não apresenta retenção da água e coesão suficientes na argamassa (REPETTE, 2011).

A EN 12350-11 (2010) propõe o teste da peneira para medir a resistência à segregação. Após preparação do concreto, uma amostra de aproximadamente 10 L é colocada em um recipiente e deixada em repouso por 15 minutos, posteriormente, a parte superior do concreto (incluindo água de exsudação), em torno de 4,8 kg, é colocada sobre a peneira com aberturas de malha de 5 mm, deixando o CAA em repouso por 2 minutos. O percentual de segregação é a relação entre a massa passante pela peneira e a massa total da amostra. Os limites de aceitação são os mesmos da NBR 15823-1 (2010).

## APÊNDICE B – ESTUDOS DE DOSAGEM REALIZADOS NA ETAPA 1

### **Metodologia utilizada para definição do traço de referência (CAA REF 1)**

#### - Definição do volume de água e ligante

Pelo fato de não se saber previamente como seria o comportamento exato dos CAAs com as cinzas utilizadas, mas prevendo-se uma redução significativa na resistência à compressão para a idade de 28 dias, procurou-se utilizar um consumo de cimento e uma relação a/c para o CAA REF 1 (100% cimento) que proporcionassem resistência elevada, e a partir deste, avaliar o comportamento dos demais CAAs.

Além disso, partiu-se da estimativa de alcançar valores de resistência à compressão, das misturas com elevados teores de cinza volante, aplicáveis para grandes blocos de fundação, relevando o fato de que cada estrutura estará sujeita a uma solicitação estrutural própria.

Em ensaios prévios realizados em CAAs, com consumo de água de 200 kg/m<sup>3</sup> e cimento de 526,3 kg/m<sup>3</sup> (a/c de 0,38), obteve-se valores de resistência à compressão da ordem de 80 MPa, aos 28 dias. Nestes ensaios, os materiais foram os mesmos que os utilizados neste estudo, porém sem ajustes minuciosos de teor de aditivo e volume de cada agregado.

Em função dos resultados encontrados terem sido considerados satisfatórios, definiu-se por manter os consumos mencionados de água e ligante para composição do CAA REF 1 e, a partir deste, se não aos 28 dias, mas em idades maiores, obter resistências à compressão iguais ou superiores à 40 MPa para os concretos com substituição do cimento por cinza volante. Concretos com classes de resistência à compressão similares, de 40 e 50 MPa, foram utilizados nos blocos de fundação das torres do Edifício Yachthouse Residence Club (SANTOS *et al.*, 2015).

#### - Composição granulométrica do agregado miúdo e definição do consumo do agregado graúdo

A partir da fixação dos volumes de cimento e água, testes foram realizados em argamassas e posteriormente em CAAs para definição do traço de referência. Para que melhor se compreenda estes processos, toda a análise prévia que serviu como apoio está relatada a seguir.

Anteriormente à definição de um traço base para testar as argamassas, alguns parâmetros foram definidos. O primeiro ponto considerado foi manter o volume de agregado miúdo, em relação ao volume de argamassa, na faixa de 40% a 50%, conforme recomendado por Melo (2005) e Gomes e Barros (2009). Deste modo, estipulou-se inicialmente uma relação volumétrica de 40% de agregado miúdo em relação ao volume total de argamassa.

A partir desta definição, testes de espalhamento em argamassas foram realizados para definição da composição granulométrica do agregado miúdo, para diferentes volumes de areia fina em substituição à areia de britagem. Nesta primeira verificação, ficou claro que, quanto maior o volume de areia fina, maior o espalhamento (verificado na mesa para índice de consistência) para mesma relação a/c e teor de aditivo. Sendo assim, neste primeiro momento, adotou-se uma argamassa que fosse composta por 45% de areia fina e 55% de areia de britagem (em volume).

Posteriormente, foram realizados testes iniciais em CAAs com  $\alpha$  volumétrico de 62%, com a mistura dos materiais realizada em argamassadeira, cuja metodologia está descrita no item 3.2.1.1. Entretanto, verificou-se que, mesmo com teores de aditivo elevados, o concreto não apresentava fluidez.

Deste modo, mantendo-se os mesmos percentuais de cada areia citados e volumes de água e cimento constantes, testes com diferentes volumes de argamassa e consequentemente de agregado graúdo foram realizados, de forma a limitar o volume de argamassa entre 65% a 75%, conforme proposto pelo método de dosagem GTec, descrito em 2.1.3.1. Observou-se então que, com volumes inferiores a 68% de argamassa, a mistura não apresentava fluidez, possivelmente em função do atrito entre as partículas de agregado graúdo, em consequência do baixo volume de argamassa.

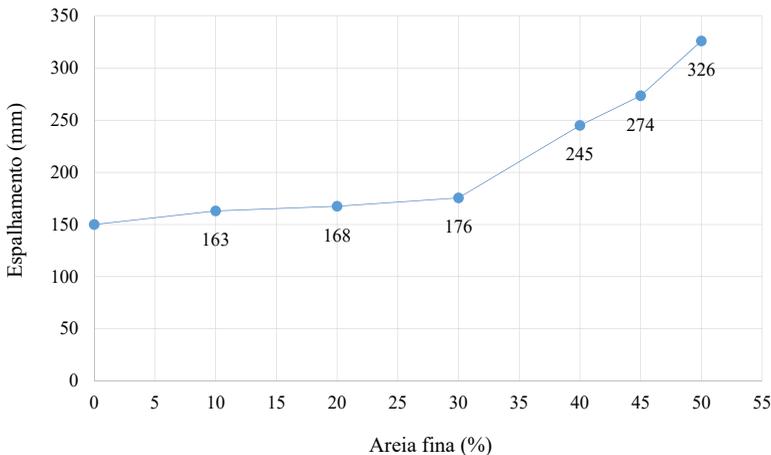
Com base nas avaliações prévias supracitadas, novos testes em argamassas foram realizados para comprovar o percentual de cada areia a ser utilizado na composição do agregado miúdo. A partir deste ponto, considerou-se um volume de 46% de agregado miúdo em relação ao volume total de argamassa e um volume de 68% de argamassa no concreto, conforme mencionado anteriormente.

A partir destas definições, obteve-se um novo traço unitário (em massa) de argamassa para verificar o espalhamento proporcionado pela substituição da areia de britagem pela areia fina, com composição inicial de 1: 1,70: 0,38 (cimento, areia e água), neste caso, referente a mistura composta apenas com a areia de britagem. As misturas foram realizadas

com teores de substituição volumétrica de areia variando de 0% a 50%. O procedimento de mistura das argamassas ocorreu conforme mencionado em 3.2.1.1, para CAA REF 1 misturado em argamassadeira, desconsiderando a adição final de agregado graúdo.

Em função da angulosidade dos grãos da areia de britagem e dos testes iniciais, esperava-se não obter valores elevados de espalhamento para a mistura sem areia fina. Assim, o teor de aditivo utilizado foi aquele que visualmente não apresentasse sinais de segregação ou exsudação na argamassa. Deste modo, o método adotado para escolha do teor de aditivo e areia fina para compor a argamassa, foi então, uma composição que atingisse os critérios de estabilidade mencionados e valores de espalhamento variando de 260 mm a 280 mm. Propostas similares de valores de espalhamento são sugeridas no método de dosagem de CAA de Repette-Melo (2005), no entanto, com particularidades distintas ao adotado neste trabalho. Diante do exposto, definiu-se um teor de aditivo superplastificante de 0,34% em relação a massa de cimento, constante em todas as argamassas desenvolvidas. Os valores de espalhamento das argamassas, para os diferentes percentuais de areia fina substituindo a areia de britagem, obtidos pela média de duas verificações diametralmente opostas, podem ser visualizados na Figura 6.

Figura 6: Valores de espalhamento para argamassas com diferentes percentuais volumétricos de areia fina substituindo a areia de britagem



Em função dos valores de espalhamento das argamassas, para os teores de 40% e 50% de areia fina, terem ficado fora do intervalo desejado, realizou-se novamente uma mistura intermediária, a qual atingiu o valor médio de 274 mm. Adotou-se, portanto, o volume de 45% de areia fina em substituição ao mesmo volume de areia de britagem. Na Tabela 3, estão apresentados os traços unitários em massa, e seus respectivos volumes, da argamassa com 100% de areia de britagem e da argamassa selecionada como base para compor o CAA REF 1.

Tabela 3: Proporções em massa e volume, para argamassas com areia de britagem e areia fina

Material	Argamassa 100% AB		Argamassa 45% AF- 55% AB	
	Massa	Volume	Massa	Volume
Cimento	1,000	0,318	1,000	0,318
AB*	1,700	0,592	0,935	0,326
AF**	0,000	0,000	0,696	0,267
Água***	0,378	0,378	0,378	0,378
Aditivo	0,003	0,003	0,003	0,003

\*AB = areia de britagem; \*\*AF = areia fina; \*\*\* Água total descontando o % de voláteis do aditivo.

Com a composição da argamassa definida, assim como seu volume no concreto, realizou-se o ajuste do teor de aditivo no CAA REF 1, conforme descrito no item 3.2.1.1.

### **Estudos prévios realizados para estabilização das misturas com 50% de CVA e CVB**

Muitos testes foram realizados, ainda na Etapa 1, para composição dos CAAs com 50% de CVA e CVB substituindo o cimento. Entretanto, apenas um apanhado geral das tentativas realizadas está relatado na sequência, visto que a descrição da grande quantidade de misturas avaliadas não traria informações relevantes ao atendimento dos objetivos específicos deste estudo.

Os procedimentos utilizados para avaliação das misturas seguiram, inicialmente, os mesmos mencionados para os CAAs com 40% de CVA e CVB substituindo o cimento, conforme abordado no item 3.2.1.2. Entretanto, para o teor de 50% de ambas as cinzas, não foi possível realizar a correção da exsudação apenas com substituição de areia fina pela cinza volante. Deste modo, tentativas incorporando outros materiais aos CAAs foram realizadas na expectativa de ajustar os

traços, ou seja, de forma que apresentassem as propriedades de autoadensabilidade requeridas para o estado fresco mantendo-se estáveis. Como exemplo, a seguir, estão relatadas algumas tentativas de correção para o teor de 50% de CVA e CVB:

- substituição de areia fina por filer calcário de origem calcítica e dolomítica;
- substituição de areia fina por sílica ativa;
- redução do volume de cinza volante para 46% e utilização de 4% de sílica ativa;
- realização de testes com redução do volume de água e substituição em igual volume de materiais sólidos, como a composição de areias, ou até mesmo, substituição completa apenas das adições mencionadas.

De forma geral, verificou-se que, para eliminar a exsudação ou reduzi-la em grande parte, elevados volumes de material fino (dentre os exemplos mencionados) deveriam ser incorporados aos CAAs com CVA e CVB. No entanto, ao reproduzir algumas destas misturas em volumes maiores na betoneira, valores elevados de tempo de escoamento pelo funil V foram observados, ultrapassando até o limite de 25 s estipulado pela NBR 15823-1 (2010).

Outro fato relevante a ser mencionado é a influência do aditivo superplastificante nas misturas. A partir da substituição do cimento por ambas as cinzas, mantido o teor de aditivo utilizado no traço de referência, as misturas apresentavam espalhamentos inferiores e exsudavam excessivamente comparando-se ao traço padrão. Ao reduzir o aditivo, diretamente reduzia-se o valor de espalhamento das misturas, porém sem eliminar a exsudação. Além disso, a necessidade de acréscimos no volume de finos para corrigir a exsudação, em determinadas situações, elevava a fluidez das misturas sem, no entanto, alcançar-se o valor esperado, demandando, portanto, acréscimos na dosagem do superplastificante. Consequentemente, nestas situações, a exsudação também aumentava ligeiramente.

Atentou-se, portanto, para a falta de materiais de maior finura nas composições dos CAAs com substituições de cimento pela CVA e CVB em teores acima de 40%. Deste modo, iniciou-se avaliações de misturas com utilização de metacaulim para composição dos CAAs com 50% de CVA e CVB. Resultados positivos no combate à exsudação foram verificados de imediato nos CAAs, mesmo misturados em

argamassadeira. No entanto, em função do grande período de tempo utilizado nas demais avaliações supracitadas, o ajuste final destes CAAs e o desenvolvimento daqueles com 60% de cinza volante foi realizado diretamente na betoneira, conforme abordado anteriormente no item 3.2.2.2.

## APÊNDICE C – DESENVOLVIMENTO E COMPOSIÇÃO INICIAL DOS CAAs

A seguir, encontra-se a descrição dos procedimentos adotados para ajuste dos parâmetros de autoadensabilidade dos CAAs, especialmente em relação àqueles com cinza volante, conforme metodologias apresentadas anteriormente no item 3.2. Em seguida, apresentam-se as composições iniciais, em massa e volume, utilizadas nas dosagens dos CAAs com seus respectivos traços unitários.

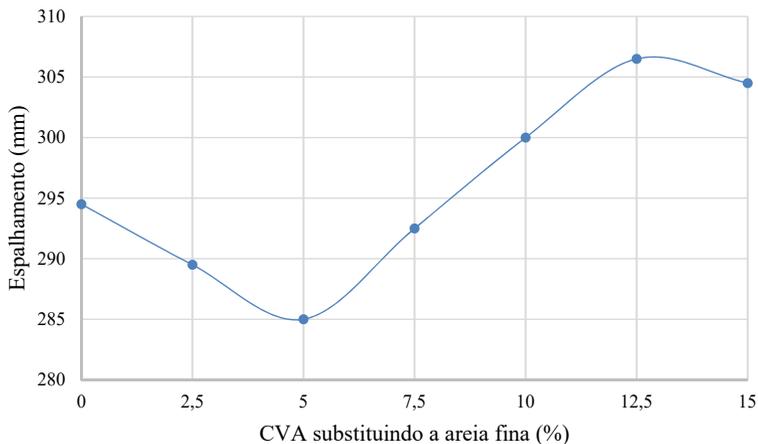
### **Produção dos CAAs**

#### - Etapa 1

Seguindo a metodologia utilizada na Etapa 1 (item 3.2.1), a dosagem do CAA REF 1 foi realizada com 32% do volume de agregado graúdo ( $320 \text{ L/m}^3$ ) e 68% de volume de argamassa ( $680 \text{ L/m}^3$ ). A composição da argamassa foi feita pela somatória dos volumes de água em  $200 \text{ L/m}^3$  (água de amassamento + voláteis do aditivo), ligante em aproximadamente  $168 \text{ L/m}^3$ , agregado miúdo em aproximadamente  $311 \text{ L/m}^3$  e aditivo superplastificante ajustado em função das propriedades no estado fresco do concreto.

A partir da constatação de que o CAA REF 1 com valor de espalhamento na mesa de índice de consistência de 305 mm apresentou os melhores resultados nos ensaios de caracterização, quando reproduzido em betoneira, este mesmo parâmetro de espalhamento foi utilizado para os CAAs com cinza volante. Deste modo, para o CAA 40A, inicialmente fez-se uma mistura (em argamassadeira) com os mesmos quantitativos de materiais do CAA REF 1, exceto pela substituição volumétrica de 40% de cimento pela cinza volante. Neste caso, verificou-se um espalhamento de 295 mm, sendo este ligeiramente inferior ao encontrado para o CAA REF 1. Sinais de exsudação foram verificados, como a formação de uma película de água na superfície da mistura e depósito de material fino na base da mesa, após o ensaio de espalhamento. A partir disso, teores volumétricos de areia fina foram substituídos por cinza volante, sendo o comportamento do CAA 40A quanto ao espalhamento medido na mesa de índice de consistência, ilustrado na Figura 7.

Figura 7: Espalhamento do CAA 40A com percentuais volumétricos de cinza volante substituindo a areia fina



Percebe-se que para teores de substituição de CVA pela areia fina maiores que 5% o valor de espalhamento aumentou. Salienta-se que o consumo de aditivo foi o mesmo em todos os casos. Para definição do volume de substituição de areia fina, para correção da exsudação, levou-se em consideração aspectos visuais, como a diminuição do brilho superficial de água e homogeneidade da mistura, ou seja, ausência de segregação. Verificou-se também, a redução do volume de água acumulada sobre a mistura, quando em repouso dentro de um recipiente.

Definiu-se para compor o CAA 40A, o teor de 10% de cinza volante substituindo a areia fina, pois não foram visualizadas diferenças significativas na redução da exsudação entre este e o teor de 12,5%. Apesar do CAA com 10% de cinza volante ter apresentado espalhamento de 300 mm, para proporcionar um valor similar ao do CAA REF 1, a dosagem do aditivo superplastificante foi ligeiramente aumentada. Esta decisão foi tomada pois observou-se no CAA REF 1, que a mistura em argamassadeira deveria apresentar um aspecto bastante fluido para se obter valores de espalhamento e viscosidade aceitáveis, quando reproduzida em betoneira. Deste modo, o espalhamento encontrado no ensaio, realizado na mesa de consistência, para o CAA 40A foi de 306 mm.

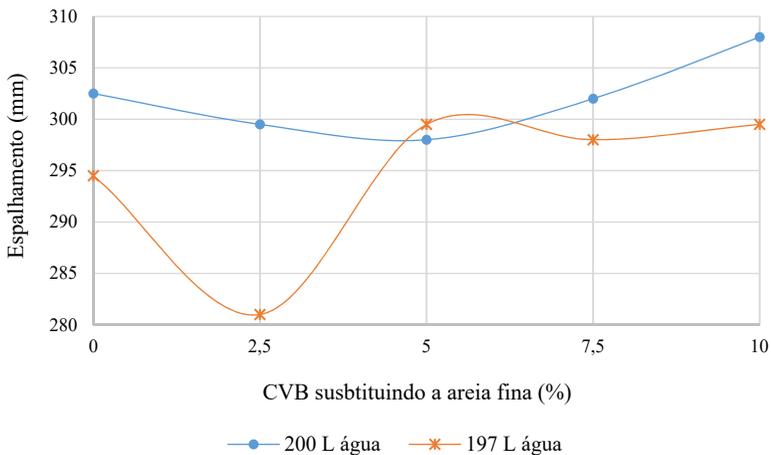
Testes reduzindo o volume de água para minimizar a exsudação também foram realizados. Entretanto, valores elevados de viscosidade

foram observados. Por este motivo, o ajuste para o traço de CAA 40A foi realizado como mencionado anteriormente.

Os procedimentos iniciais para compor o CAA 40B foram os mesmos descritos para o CAA 40A. Da mesma forma, com substituição apenas de cimento por 40% de CVB também se verificou a ocorrência de exsudação, assim como, substituições de areia fina por cinza volante ocasionaram aumento nos valores de espalhamento. Neste caso, inicialmente limitou-se a substituição de areia fina em 10%, para que se tivesse um comparativo com o CAA 40A. Como o valor de espalhamento verificado na mesa de consistência foi de 308 mm, sendo maior que o do CAA REF 1, o volume de aditivo não foi alterado. Ao reproduzir este CAA na betoneira, durante a realização do ensaio de espalhamento verificou-se um brilho de água considerado excessivo sobre o volume de concreto. Além disso, minutos após a moldagem dos corpos de prova, ocorreu a formação de uma lâmina de água na superfície dos mesmos. Deste modo, esta mistura foi descartada.

Definiu-se então, pela redução do volume de água da mistura, conforme metodologia descrita em 3.2.1.2 e, em função do novo consumo de agregado miúdo, também substituir a areia fina por cinza volante. A Figura 8 representa os valores de espalhamento para o CAA 40B, com diferentes teores de CVB substituindo a areia fina, para misturas com volumes de 200 e 197 L/m<sup>3</sup> de água.

Figura 8: Espalhamento para CAA 40B com percentuais volumétricos de cinza volante substituindo a areia fina, para volumes de água de 200 e 197 L/m<sup>3</sup>



A redução no volume de água em 3 L/m<sup>3</sup>, com compensação deste mesmo volume em agregado miúdo, refletiu em uma redução nos valores de espalhamento, com exceção para o teor de 5% de cinza volante substituindo a areia fina. O CAA 40B foi executado com 197 L/m<sup>3</sup> de água total e 10% em volume de CVB substituindo a areia fina. Pelo mesmo motivo exposto para o CAA 40A, neste caso, também se elevou o volume de aditivo superplastificante na mistura, a qual apresentou espalhamento final na mesa de consistência de 301 mm.

Não foi possível relacionar os tempos de espalhamento dos CAAs na mesa de consistência com a viscosidade aparente medida nos ensaios de funil V ou T<sub>500</sub>. Por este motivo, estes valores não foram relatados.

## - Etapa 2

Conforme abordado no item 3.2.2, para esta etapa da pesquisa reproduziu-se o CAA de referência desenvolvido na Etapa 1. A partir da definição do CAA REF 2 desenvolveu-se os CAAs com substituições de cimento pela CVA e CVB nos teores de 50% e 60%, em volume. Conforme mencionado no item 3.2.2.2, nestes CAAs utilizou-se o metacaulim para correção da exsudação e melhoramento de

propriedades no estado fresco. Os CAAs com 40%, 50% e 60% de CVC também foram produzidos nesta etapa.

O CAA com 50% de CVA em substituição ao cimento e metacaulim em substituição da areia fina para correção da exsudação, não apresentou fluidez satisfatória, ou seja, espalhamento dentro dos limites previamente definidos. Este comportamento se repetiu mesmo com acréscimos no volume de aditivo superplastificante e/ou aumento no volume de finos. Além do mais, a viscosidade para o CAA 50A apresentava-se demasiadamente elevada, acima de 15 s, quando avaliada pelo ensaio de funil V.

Em função deste comportamento, definiu-se pelo aumento do volume de água no CAA 50A, mantendo-se o metacaulim como ligante complementar para estabilização da mistura. Entretanto, como a dosagem foi realizada para 1000 L/m<sup>3</sup> de concreto, para equilibrar este volume inicial, a água acrescentada foi reduzida em igual volume do agregado miúdo (composição de areias). A partir desta nova configuração, iniciou-se novamente as adaptações do traço com a utilização de metacaulim em substituição da areia fina e ajuste no teor de aditivo. O CAA 50A com teor volumétrico de 4% de metacaulim, em substituição ao mesmo volume de areia fina, e 210 L/m<sup>3</sup> de água total apresentou os melhores resultados nos ensaios de caracterização no estado fresco. O consumo de aditivo superplastificante, em consequência das alterações mencionadas, foi reduzido em relação àquele utilizado no CAA REF 2.

O CAA 60A foi desenvolvido a partir da composição utilizada no CAA 50A. Com a substituição do cimento por 60% de CVA, e mantendo-se os mesmos volumes de metacaulim e aditivo utilizados no CAA 50A, verificou-se comportamentos similares entre o CAA 60A e seu precedente. Portanto, a estrutura dos traços utilizada na dosagem inicial dos CAAs 50A e 60A foi basicamente a mesma, exceto pelos diferentes percentuais volumétricos de CVA substituindo o cimento.

A partir da utilização da CVB, verificou-se que o CAA 50B apresentou comportamento no estado fresco diferenciado em relação ao CAA 50A. Neste caso, mesmo mantendo-se o volume de água inicial em 200 L/m<sup>3</sup> e com a utilização de metacaulim para controle da exsudação, foi necessária a redução do volume de aditivo superplastificante, comparado ao CAA REF 2, para manter o espalhamento em torno de 700 mm. Também ficou claro que a quantidade de metacaulim necessária para reduzir a exsudação no CAA 50B, com seu respectivo teor de aditivo para atender a fluidez desejada, não seria a mesma para proporcionar coesão suficiente para a

pasta/argamassa. Verificou-se, durante a execução de alguns testes no ensaio do funil V, que a argamassa não apresentava coesão suficiente para “carregar” o agregado graúdo de forma homogênea. Este fato acarretou, em algumas situações, um pequeno acréscimo no tempo de escoamento do CAA devido ao acúmulo de agregado graúdo nos momentos finais do ensaio. É de grande relevância destacar que nestas situações, no ensaio do *slump flow*, o espalhamento do CAA com 50% de CVB ocorria satisfatoriamente, ou seja, com presença do agregado graúdo por toda a extensão das misturas.

Portanto, definiu-se pelo aumento do volume de finos na mistura do CAA 50B e, conseqüentemente de coesão na mistura. Estima-se que esta decisão foi acertada uma vez que, para um mesmo teor de aditivo, o aumento do volume de metacaulim reduziu o tempo de escoamento em fluxo confinado pelo funil V, sem influenciar significativamente a fluidez do CAA. Neste processo de ajustes do CAA 50B, procurou-se também fazer um refinamento entre os teores de metacaulim que proporcionaram os melhores resultados, sendo estes de 5% e 6% em substituição da areia fina. O objetivo era vincular, dentro das possibilidades, bons resultados quanto a fluidez, viscosidade e estabilidade, aliados a um volume mínimo possível de metacaulim no CAA. Utilizou-se, portanto, o teor volumétrico de 5,5% de metacaulim para compor o CAA 50B.

O CAA 60B foi desenvolvido a partir das adequações realizadas no CAA 50B, apresentando o mesmo comportamento, ou seja, falta de coesão. Esta particularidade novamente foi corrigida com o aumento no volume de finos através da utilização do metacaulim em substituição da areia fina, no teor volumétrico de 6,5%, além do ajuste no teor de aditivo.

Referente a CVC, moída, esta foi utilizada para verificar a influência da finura da cinza volante no comportamento de CAAs no estado fresco. O CAA 40C foi executado apenas com a substituição do cimento por 40% de CVC, possibilitando também a redução do teor de aditivo comparado ao utilizado no CAA REF 2.

No desenvolvimento dos CAA 50C e 60C, quanto a ocorrência de exsudação, verificou-se visualmente melhorias comparando-se aos CAAs produzidos com a CVA e CVB, no entanto, com necessidades de pequenas correções. Após ajustar o teor de aditivo para atender a fluidez desejada, percebeu-se a falta de coesão na mistura, da mesma forma como foi verificado nos CAAs confeccionados com a CVB. Em resumo, para se obter um CAA com teor de aditivo para proporcionar espalhamento próximo a 700 mm, a mistura não apresentava coesão

suficiente para conduzir o agregado graúdo ao passar por restrições. Reduzindo-se o aditivo, o CAA não apresentava fluidez satisfatória. Decidiu-se, então, aumentar o volume de finos através da substituição da areia fina pela própria CVC e acertar o teor de aditivo para cada avaliação. Todos os parâmetros de autoadensabilidade, previamente definidos para este estudo, foram conseguidos com a substituição de 7,5% e 10% de areia fina, pelos mesmos teores volumétrico de CVC, para os CAAs 50C e 60C, respectivamente. O consumo de aditivo, nestes casos, também foi menor ao utilizado no CAA REF 2 e semelhante aos demais CAAs com 50 e 60% de cinza volante, conforme demonstrado a seguir.

### **Composição inicial dos CAAs**

Os consumos de materiais, em massa e volume, utilizados na dosagem inicial dos CAAs produzidos na Etapa 1, e respectivos traços unitários, estão apresentados na Tabela 4. A Tabela 5 apresenta as referidas especificações para os CAAs executados na Etapa 2.

Destaca-se que o volume de ligante apresentado para os CAAs representa a somatória do consumo inicial de ligante que corresponde a 167,6 L/m<sup>3</sup>, comum em todos os casos, mais o consumo de ligante complementar. Este último, por sua vez, é específico para cada CAA com cinza volante, sendo composto pela própria cinza volante ou pelo metacaulim. Do mesmo modo, o volume de finos inclui o cimento, o pulverulento dos agregados e, para os CAAs com cinza volante, considera também o volume da cinza em substituição ao cimento, além do volume complementar de cinza volante ou metacaulim utilizado para melhoramento dos traços no estado fresco.

Tabela 4: Traço unitário e consumo inicial de materiais, em massa e volume, utilizados na dosagem do CAA REF 1, 40A e 40B, produzidos na Etapa 1

Identificação	REF 1			40A			40B		
	Traço unitário	Consumos kg/m <sup>3</sup>	Consumos L/m <sup>3</sup>	Traço unitário	Consumos kg/m <sup>3</sup>	Consumos L/m <sup>3</sup>	Traço unitário	Consumos kg/m <sup>3</sup>	Consumos L/m <sup>3</sup>
Cimento	1	526,3	167,6	0,704	315,8	100,6	0,688	315,8	100,6
Cinza volante	-	-	-	0,296	132,8	67,0	0,312	143,5	67,0
Consumo ligante inicial	1	526,3	167,6	1	448,5	167,6	1	459,3	167,6
Cinza volante complementar	-	-	-	0,062	27,7	14,0	0,066	30,3	14,1
Areia fina	0,694	365,5	140,0	0,733	328,9	126,0	0,723	332,1	127,2
Areia de britagem	0,933	491,3	171,2	1,095	491,1	171,1	1,080	495,9	172,8
Pedrisco	1,708	899,2	320,0	2,005	899,2	320,0	1,958	899,2	320,0
Água*	0,377	198,3	198,3	0,442	198,23	198,23	0,425	195,3	195,3
Aditivo	0,0059	3,11	2,82	0,0074	3,32	3,02	0,0070	3,21	2,92
TOTAL	-	2484	1000	-	2397	1000	-	2415	1000
Água/cimento**		0,38			0,63			0,62	
Ligante (volume)		168			182			182	
Água/ligante (volume)		1,19			1,10			1,08	
Finos (volume)		199			213			213	
Água/finos (volume)		1,01			0,94			0,92	

\*água de mistura = água total - voláteis do aditivo;

\*\* água total/cimento.

Tabela 5: Traço unitário e consumo inicial de materiais, em massa e volume, utilizados na dosagem do CAA REF 2, 50A e 60A, produzidos na Etapa 2

Identificação	REF 2			50A			60A		
	Traço unitário	Consumos kg/m <sup>3</sup>	Consumos L/m <sup>3</sup>	Traço unitário	Consumos kg/m <sup>3</sup>	Consumos L/m <sup>3</sup>	Traço unitário	Consumos kg/m <sup>3</sup>	Consumos L/m <sup>3</sup>
Cimento	1	526,3	167,6	0,613	263,2	83,8	0,514	210,5	67,0
Cinza volante	-	-	-	0,387	165,9	83,8	0,486	199,1	100,6
Consumo ligante inicial	1	526,3	167,6	1	429,1	167,6	1	409,7	167,6
Metacaulim	-	-	-	0,032	13,9	5,4	0,034	13,9	5,4
Areia fina	0,695	365,8	140,1	0,793	340,1	130,3	0,830	340,1	130,3
Areia de britagem	0,934	491,6	171,3	1,110	476,1	165,9	1,162	476,1	165,9
Pedrisco	1,708	899,2	320,0	2,096	899,2	320,0	2,195	899,2	320,0
Água*	0,377	198,6	198,6	0,487	208,9	208,9	0,510	208,9	208,9
Aditivo	0,0049	2,58	2,34	0,0047	2,00	1,82	0,0049	2,00	1,82
TOTAL	-	2484	1000	-	2369	1000	-	2350	1000
Água/cimento**		0,38			0,80			1,00	
Ligante (volume)		168			173			173	
Água/ligante (volume)		1,19			1,21			1,21	
Finos (volume)		199			204			204	
Água/finos (volume)		1,00			1,03			1,03	

\*água de mistura = água total – voláteis do aditivo;

\*\* água total/cimento.

Continua ...

Continuação da Tabela 5: CAA 50B e 60B, produzidos na Etapa 2

Identificação	50B			60B		
	Traço unitário	Consumos kg/m <sup>3</sup>	Consumos L/m <sup>3</sup>	Traço unitário	Consumos kg/m <sup>3</sup>	Consumos L/m <sup>3</sup>
Cimento	0,595	263,2	83,8	0,494	210,5	67,0
Cinza volante	0,405	179,3	83,8	0,506	215,2	100,6
Consumo ligante inicial	1	442,5	167,6	1	425,7	167,6
Metacaulim	0,045	19,7	7,7	0,055	23,3	9,1
Areia fina	0,782	345,9	132,5	0,804	342,2	131,1
Areia de britagem	1,112	491,9	171,4	1,155	491,9	171,4
Pedrisco	2,032	899,2	320,0	2,112	899,2	320,0
Água*	0,450	198,9	198,9	0,467	198,9	198,9
Aditivo	0,0045	1,98	1,80	0,0047	2,00	1,82
TOTAL	-	2400	1000	-	2383	1000
Água/cimento**		0,76			0,95	
Ligante (volume)		175			177	
Água/ligante (volume)		1,14			1,13	
Finos (volume)		207			208	
Água/finos (volume)		0,97			0,96	

\*água de mistura = água total - voláteis do aditivo;

\*\* água total/cimento.

Continua ...

Continuação da Tabela 5: CAA 40C, 50C e 60C, produzidos na Etapa 2

Identificação	40C			50C			60C		
	Traço unitário	Consumos kg/m <sup>3</sup>	Consumos L/m <sup>3</sup>	Traço unitário	Consumos kg/m <sup>3</sup>	Consumos L/m <sup>3</sup>	Traço unitário	Consumos kg/m <sup>3</sup>	Consumos L/m <sup>3</sup>
Cimento	0,666	315,8	100,6	0,571	263,2	83,8	0,470	210,5	67,0
Cinza volante	0,334	158,2	67,0	0,429	197,8	83,8	0,530	237,3	100,6
Consumo ligante inicial	1	474,0	167,6	1	460,9	167,6	1	447,9	167,6
Cinza volante complementar	-	-	-	0,054	24,8	10,5	0,074	33,1	14,0
Areia fina	0,772	366,1	140,3	0,734	338,5	129,7	0,736	329,4	126,2
Areia de britagem	1,038	492,0	171,4	1,067	491,9	171,4	1,098	491,9	171,4
Pedrisco	1,897	899,2	320,0	1,951	899,2	320,0	2,008	899,2	320,0
Água*	0,420	199,0	199,0	0,431	198,9	198,9	0,444	199,0	199,0
Aditivo	0,0039	1,85	1,68	0,0045	2,07	1,89	0,0044	1,96	1,78
TOTAL	-	2432	1000	-	2416	1000	-	2402	1000
Água/cimento**		0,63			0,76			0,95	
Ligante (volume)		168			178			182	
Água/ligante (volume)		1,19			1,12			1,10	
Finos (volume)		199			210			213	
Água/finos (volume)		1,00			0,95			0,94	

\*água de mistura = água total - voláteis do aditivo;

\*\* água total/cimento.



## APÊNDICE D - VALORES DE RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO E MÓDULO DE ELASTICIDADE DOS CAAs

Tabela 6: Resistência à compressão dos CAAs produzidos na Etapa 1

Resistência à compressão (MPa)									
CP	28 dias			91 dias			180 dias		
	REF 1	40A	40B	REF 1	40A	40B	REF 1	40A	40B
1	84,0	53,8	57,7	93,8	63,8	70,0	97,3	72,4	72,2
2	92,8	53,8	58,2	91,0	63,5	67,1	102,7	73,4	74,2
3	85,2	54,7	57,4	93,1	66,5	71,4	98,0	69,0	77,2
<b>Média</b>	<b>87,3</b>	<b>54,1</b>	<b>57,8</b>	<b>92,6</b>	<b>64,6</b>	<b>69,5</b>	<b>99,3</b>	<b>71,6</b>	<b>74,5</b>

Tabela 7: Módulo de elasticidade dos CAAs produzidos na Etapa 1

Módulo de elasticidade (GPa)									
CP	28 dias			91 dias			180 dias		
	REF 1	40A	40B	REF 1	40A	40B	REF 1	40A	40B
2	41,3	35,7	40,3	43,8	42,0	45,2	43,8	43,1	43,2
3	46,7*	36,1	39,3	43,6	41,6	45,2	43,8	42,9	43,7
<b>Média</b>	<b>41,3</b>	<b>35,9</b>	<b>39,8</b>	<b>43,7</b>	<b>41,8</b>	<b>45,2</b>	<b>43,8</b>	<b>43,0</b>	<b>43,4</b>

\* Valor desconsiderado.

Tabela 8: Resistência à compressão dos CAAs produzidos na Etapa 2

Resistência à compressão (MPa)									
CP	28 dias								
	REF 2	40C	50A	50B	50C	60A	60B	60C	
1	89,0	61,1	47,5	54,4	57,1	32,9	37,9	43,5	
2	87,6	64,2	46,5	53,7	59,8	35,7	38,4	43,4	
3	89,5	62,2	44,5	55,7	57,2	35,2	40,3	42,6	
<b>Média</b>	<b>88,7</b>	<b>62,6</b>	<b>46,2</b>	<b>54,6</b>	<b>58,0</b>	<b>34,6</b>	<b>38,9</b>	<b>43,2</b>	
CP	91 dias								
	REF 2	40C	50A	50B	50C	60A	60B	60C	
1	96,5	74,7	58,1	57,2	71,2	44,7	53,8	62,3	
2	95,4	76,1	57,9	62,7	74,6	44,7	53,7	62,0	
3	104,6	73,8	57,0	62,6	73,3	47,3	55,0	61,6	
<b>Média</b>	<b>98,8</b>	<b>74,9</b>	<b>57,7</b>	<b>60,8</b>	<b>73,0</b>	<b>45,6</b>	<b>54,2</b>	<b>62,0</b>	

Tabela 9: Módulo de elasticidade dos CAAs produzidos na Etapa 2

Módulo de Elasticidade (GPa)								
CP	28 dias							
	REF 2	40C	50A	50B	50C	60A	60B	60C
2	42,7	37,8	31,8	37,4	37,1	30,6	33,5	34,8
3	43,1	36,4	31,8	38,4	36,2	30,3	33,5	34,5
<b>Média</b>	<b>42,9</b>	<b>37,1</b>	<b>31,8</b>	<b>37,9</b>	<b>36,7</b>	<b>30,4</b>	<b>33,5</b>	<b>34,7</b>
CP	91 dias							
	REF 2	40C	50A	50B	50C	60A	60B	60C
2	43,5	41,7	35,3	39,4	40,9	33,4	37,0	41,3
3	43,1	42,1	35,3	39,2	40,9	33,8	37,5	41,0
<b>Média</b>	<b>43,3</b>	<b>41,9</b>	<b>35,3</b>	<b>39,3</b>	<b>40,9</b>	<b>33,6</b>	<b>37,2</b>	<b>41,2</b>