

DIOGO JATOBÁ DE HOLANDA CAVALCANTI

**CONTRIBUIÇÃO AO ESTUDO DE
PROPRIEDADES DO CONCRETO AUTO-
ADENSÁVEL VISANDO SUA APLICAÇÃO EM
ELEMENTOS ESTRUTURAIS**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação
em Engenharia Civil da Universidade Federal de Alagoas
como requisito parcial para obtenção do título de Mestre
em Engenharia Civil.

Maceió/AL – 2006

DIOGO JATOBÁ DE HOLANDA CAVALCANTI

**CONTRIBUIÇÃO AO ESTUDO DE
PROPRIEDADES DO CONCRETO AUTO-
ADENSÁVEL VISANDO SUA APLICAÇÃO EM
ELEMENTOS ESTRUTURAIS**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação
em Engenharia Civil da Universidade Federal de Alagoas
como requisito parcial para obtenção do título de Mestre
em Engenharia Civil.

Área de concentração: **Estruturas**

Orientador: **Prof. Dr. Paulo César Correia Gomes**

**Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil – PPGEC
Departamento de Engenharia Estrutural – EES
Centro de Tecnologia – CTEC
Universidade Federal de Alagoas – UFAL
Maceió/AL – 2006**

Catálogo na fonte
Universidade Federal de Alagoas
Biblioteca Central
Divisão de Tratamento Técnico
Bibliotecária Responsável: Helena Cristina Pimentel do Vale

C376c Cavalcanti, Diogo Jatobá de Holanda. Contribuição ao Estudo de Propriedades do Concreto auto-adensável visando sua aplicação em elementos estruturais / Diogo Jatobá de Holanda Cavalcanti - Maceió, 2006. 141f. : il. Orientador: Prof. Dr. Paulo César Correia Gomes Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil: Estruturas) – Universidade Federal de Alagoas. Centro de Tecnologia. Maceió, 2006. 1. Concreto auto-adensável. 2. Concreto auto-adensável - Propriedades mecânicas 3. Resíduos (filer). I. Título. CDU: 691.32

Dedico este trabalho primeiramente a Deus, aos meus familiares e amigos, pela compreensão durante o período de seu desenvolvimento.

Agradecimentos

Ao meu orientador Prof. Dr. Paulo César Correia Gomes, pela sua dedicação, críticas construtivas, e principalmente, pelos conteúdos transmitidos durante todo o período da dissertação, que foram decisivos para a sua elaboração e conclusão. Ao Coordenador do Curso de Mestrado, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil (PPGEC), Prof. Dr. Severino Pereira Cavalcanti Marques, pelo seu grande apoio em todos os momentos.

As empresas BRITEX, IMCREL, Cimentos ZEBU, MARMOGRAN Mármore e Granitos e MBT - Master Builders Technologies, pela doação dos materiais necessários para confecção dos concretos. A fábrica de pré-moldados INDARC, na pessoa do Eng.º Gilberto, pelo empréstimo de fôrmas para confecção das placas.

A Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Alagoas (FAPEAL), pelo financiamento da pesquisa, possibilitando a compra de materiais e equipamentos.

Aos Professores Msc. Celso Luiz Piatti Neto e Msc. Amaro Monteiro de Carvalho, pelas cartas de recomendação do Mestrado e a todos os Professores que ministraram as matérias, pelos relevantes conhecimentos transmitidos.

Aos Colegas de Mestrado, que de alguma forma contribuíram para o sucesso dessa caminhada.

Aos funcionários do Núcleo de Pesquisas Tecnológicas (NPT), pela ajuda indispensável para o desenvolvimento da pesquisa experimental; em especial aos técnicos Marcos Wanderley, Alexandre Nascimento de Lima, Fábio José da Silva e Valdemir Gomes de Farias, pela ajuda participativa na maior parte dos experimentos. Ao mestrando do curso de Engenharia Civil da UFAL, Alexandre Rodrigues de Barros, pela fundamental ajuda na parte experimental deste trabalho.

Ao Laboratório de Engenharia Química da Universidade Federal de Alagoas, pela participação nos ensaios de caracterização dos materiais.

Aos meus pais: Alexandre Portela de Holanda Cavalcanti e Eliana Jatobá de Holanda Cavalcanti; irmãos: Daniel Jatobá de Holanda Cavalcanti e Livia Jatobá de Holanda Cavalcanti; namorada: Ana Thaisa Procópio; e principalmente a DEUS, pela presença e incentivo constante, permitindo o início, o desenvolvimento e a conclusão dessa longa caminhada.

Agradecimentos	v
Lista de Figuras	ix
Lista de Tabelas	xi
Lista de Símbolos	xiii
Resumo	xvii
Abstract	xviii
Capítulo 1	19
1. Introdução	19
1.1. Considerações iniciais.....	19
1.2. Relevância do tema.....	21
1.3. Objetivos.....	23
1.4. Síntese dos Capítulos.....	23
Capítulo 2	25
2. Concreto auto-adensável.....	25
2.1. Origem e definição.....	25
2.2. Vantagens e aplicações.....	26
2.3. Materiais e proporções das misturas.....	29
2.3.1. Cimento.....	30
2.3.2. Agregados.....	31
2.3.3. Aditivos minerais.....	31
2.3.4. Aditivos químicos superplastificantes.....	38
2.3.5. Água.....	40
2.4. Métodos de dosagem.....	40
2.5. Cuidados na produção e aplicação do CAA.....	49
2.6. Propriedades do CAA no estado fresco.....	52
2.7. Propriedades do CAA no estado endurecido.....	57
Capítulo 3	66
3. Materiais e métodos	66
3.1. Considerações iniciais.....	66
3.2. Materiais utilizados na composição do CAA.....	66

3.2.1.	Cimento.....	66
3.2.2.	Agregados.....	66
3.2.3.	Resíduo de serragem de mármore e granito (RSMG).....	68
3.2.4.	Superplastificante.....	71
3.2.5.	Água.....	72
3.3.	Métodos de ensaios.....	72
Capítulo 4		88
4.	Produção dos concretos.....	88
4.1.	Considerações iniciais.....	88
4.2.	Produção do CAA.....	90
4.3.	Determinação do volume de pasta no CA.....	97
4.4.	Determinação das demais propriedades do CAA40.....	101
4.5.	Produção do concreto convencional.....	105
Capítulo 5		109
5.	Propriedades do CAA no estado endurecido.....	109
5.1.	Considerações Iniciais.....	109
5.2.	Verificação da auto-adensabilidade do CAA.....	110
5.3.	Procedimento de moldagem em c.p. cilíndricos de CAA	112
5.4.	Determinação das propriedades mecânicas.....	115
5.5.	Evolução e relações das propriedades mecânicas do CAA.....	120
5.5.1.	Considerações iniciais.....	120
5.5.2.	Evolução das propriedades mecânicas do CAA.....	120
Capítulo 6		131
6.	Considerações finais e sugestões.....	131
Capítulo 7		134
7.	Referências bibliográficas.....	134

Lista de Figuras

Figura 01 (a) – Blocos de pedras graníticas (b) - Lama do RSMG à céu aberto.....	22
Figura 02 – Bloco de ancoragem da ponte Akashi Kaikyo, no Japão.....	27
Figura 03 – Ilustração do túnel em Yokohama, no Japão.....	27
Figura 04 – Recuperação de uma ponte, na Suíça.....	29
Figura 05 (a) – Blocos de pedras graníticas (b) – Resíduo na forma de polpa abrasiva (lama).....	35
Figura 06 – Vistas dos teares na operação de cortes dos blocos.....	35
Figura 07 – Detalhe do polimento da superfície das chapas.....	36
Figura 08 – Detalhe do destino do resíduo do polimento das chapas aos tanques..	37
Figura 09 (a) – Detalhe da lagoa em sua fase madura (b) - Detalhe da camada corrosiva provocada pela presença da granalha.....	37
Figura 10 – Micrografia de partículas de cimento em uma solução água-cimento (a) - sem aditivo superplastificante (b) - com aditivo superplastificante.....	38
Figura 11 – Ilustração do tronco de cone de consistência.....	42
Figura 12 – Esquema do fluxograma do método de dosagem de Okamura	44
Figura 13 (a) - Ensaio do cone de Marsh (b) - Curva log T x sp/c (%).....	48
Figura 14 – Ilustração do mini-slump.....	49
Figura 15 – Esquema do fluxograma do método de dosagem de Gomes.....	50
Figura 16 – Ensaio de espalhamento do cone de Abrams (Slump Flow Test).....	53
Figura 17 – Ilustração do Funil V (V-Funnel).....	54
Figura 18 – Ensaio da Caixa L (L-Box).....	54
Figura 19 – Ensaio para quantificar segregação no CAA. (a) - EMBORG et al. e HAMADA et al., 2000. (b) - SEDRAN e DE LARRARD, 1999.....	55
Figura 20 – Ensaio do Tubo U.....	56
Figura 21 – Equipamento para Teste de auto-adensabilidade no canteiro de obras	57
Figura 22 – Curvas granulométricas da brita e areia utilizada.....	68
Figura 23 (a) – Pré-secagem do resíduo ao sol (b) - Estocagem do resíduo.....	69
Figura 24 (a) – Apiloamento do RSMG (b) - Peneiramento do RSMG.....	70
Figura 25 – Curva granulométrica do RSMG # 300 µm.....	71
Figura 26 – Ilustração do ensaio do Método de Blaine.....	73
Figura 27 – Ilustração do ensaio do Método do Picnômetro.....	76
Figura 28 – Ilustração do cone de Marsh.....	77
Figura 29 (a) – Mini-slump (b) - Tronco de cone de consistência.....	78
Figura 30– Ilustração do Slump Flow Test.....	79
Figura 31 – Ilustração do Funil V.....	81
Figura 32 – Ilustração da Caixa L (L-Box).....	82
Figura 33 – Ilustração do Tubo U.....	82
Figura 34 – Ilustração do ensaio de auto-adensabilidade.....	84
Figura 35 – Ilustração da prensa (a) - AMSLER (b) - EMIC.....	85
Figura 36 – Ensaio de resistência à compressão.....	86
Figura 37 – Ensaio de resistência à compressão diametral.....	86

Figura 38 – Determinação do módulo de deformação longitudinal.....	87
Figura 39 – Curvas granulométricas do RSMG # 300 µm e do RSMG # 600 µm.....	89
Figura 40 – Cone de Marsh em pastas com RSMG # 300 µm e RSMG # 600 µm LISBOA (2004).....	91
Figura 41 – Mini-slump em pastas com RSMG # 300 µm e RSMG # 600 µm LISBOA (2004).....	92
Figura 42 – Espalhamento das pastas com RSMG # 300 µm (a) - $sp/c = 0,3$ (b) - $sp/c = 0,4$	92
Figura 43 – Cone de Marsh em argamassas com RSMG# 300 µm RSMG# 600 µm LISBOA (2004).....	93
Figura 44 – Tronco de cone em argamassas com RSMG #300 µm e RSMG# 600 µm (LISBOA, 2004).....	94
Figura 45 – Espalhamento da argamassa com (a) - $sp/c = 0,45$ (b) - $sp/c = 0,525$..	95
Figura 46 – Curva da composição do esqueleto granular dos agregados.....	96
Figura 47 – CAA com 38 % de volume de pasta (a) - espalhamento final (b) - aspecto visual	99
Figura 48 – CAA com 40 % de volume de pasta (a) - espalhamento final (b) - aspecto visual.....	99
Figura 49 – CAA com 42 % de volume de pasta.....	99
Figura 50 – Execução do ensaio do Funil V.....	101
Figura 51 (a) e (b) – Execução do ensaio da Caixa L (L-Box).....	102
Figura 52 – Execução do ensaio do Tubo U.....	103
Figura 53 – Ensaio de auto-adensabilidade do CAA para preenchimento de placa estrutural.....	104
Figura 54 – Ilustração do abatimento no cone de Abrams para o concreto convencional.....	108
Figura 55 – Aspecto visual do c.p. 15 cm x 30 cm moldado com o CAA não vibrado.....	111
Figura 56 – Aspecto visual da superfície de ruptura do c.p. 15 cm x 30 cm com CAA vibrado.....	112
Figura 57 – Curva de evolução de resistência à compressão (relação f_{cj}/f_{c28} ao longo das idades).....	123
Figura 58 – Curvas de evolução do CAA com dados do estudo e de outros autores da literatura.....	124
Figura 59 – Curvas de evolução de f_c	125
Figura 60 – Relação $f_t \times f_c$ para o CAA estudado, aos 03, 07, 28 e 91 dias.....	126
Figura 61 – Curva de ajuste exponencial da relação experimental entre $E_c \times f_c$ para CAA, com dados experimentais do estudo e de vários autores da literatura...	128
Figura 62 – Relação $E_c \times f_c$ experimentais (CAA) e propostas na literatura.....	129

Lista de Tabelas

Tabela 01 – Faixas para caracterização das propriedades de fluxo do CAA.....	46
Tabela 02 – Valores de f_c , aos 02, 07 e 28 dias para CAA.....	61
Tabela 03 – Valores de f_c , aos 07 dias e 28 dias para CAA.....	61
Tabela 04 – Valores de f_c , aos 07, 28, e 49 dias para CAA	62
Tabela 05 – Valores médios de f_c , aos 03, 07, 28, 52 e 72 dias	63
Tabela 06 – Caracterização dos agregados utilizados na produção do CAA.....	67
Tabela 07 – Composição granulométrica da brita e areia utilizada.....	68
Tabela 08 – Características do RSMG # 300 μ m.....	71
Tabela 09 – Propriedades do aditivo superplastificante utilizado.....	72
Tabela 10 – Características do RSMG # 300 μ m e RSMG # 600 μ m	89
Tabela 11 – Composição dos concretos (kg/m^3) variando o volume de pasta....	97
Tabela 12 – Composição dos concretos (kg/m^3) variando o volume de pasta...	97
Tabela 13 – Ensaio de espalhamento para diferentes CAA.....	100
Tabela 14 – Ensaio de espalhamento no cone de Abrams, para diferentes CAA.....	100
Tabela 15 – Resultado do ensaio do Funil V.....	101
Tabela 16 – Resultados do ensaio da Caixa L (L-Box).....	102
Tabela 17 – Resultados do ensaio do Tubo U.....	103
Tabela 18 – Características de auto-adensabilidade do CAA40.....	104
Tabela 19 – Dosagem do concreto convencional.....	107
Tabela 20 – Classificação do concreto convencional quanto à sua consistência (NBR 7223/92).....	107
Tabela 21 – Resistência à compressão de CAA não vibrado e vibrado.....	111
Tabela 22 – Resistência à tração de CAA não vibrado e vibrado.....	111
Tabela 23 – Valores de f_c , em c.p. cilíndricos de 10 cm x 20 cm, variando a moldagem.....	113
Tabela 24 – Valores de f_c , em c.p. cilíndricos de 15 cm x 30 cm, variando a moldagem.....	114
Tabela 25 – Valores de f_c , em c.p. cilíndricos de 10 cm x 20 cm, para o CAA40	115
Tabela 26 – Média dos valores de f_c para CAA40 e CAA42, em c.p. 10 cm x 20 cm.....	116

Tabela 27 – Valores de f_c para o concreto convencional, em c.p. 10 cm x 20 cm.....	116
Tabela 28 – Valores de f_t , em c.p. cilíndricos 10 cm x 20 cm, para o CAA40....	117
Tabela 29 – Valores de f_t , aos 28 dias, em c.p. 10 cm x 20 cm, do CAA40, CAA42.....	118
Tabela 30 – Valores de E_c , em c.p. cilíndricos de 10 cm x 20 cm, para o CAA40.....	118
Tabela 31 – Valores de E_c , aos 28 dias, em c.p. 10 cm x 20 cm, do CAA40, CAA42.....	119
Tabela 32 – Valores de E_c para o concreto convencional, em c.p. 10 cm x 20 cm.....	119
Tabela 33 – Relações f_{c7}/f_{c28} , do CAA de outros autores, CAA40 e C.C., em c.p. 10 cm x 20 cm.....	122
Tabela 34 – Comparativo dos valores de f_t para CAA40 e NBR 6118/03.	127
Tabela 35 – Comparativos de E_c do CAA40 e da NBR 6118/03, para diferentes resistências.....	130

Lista de Símbolos

CAA	Concreto auto-adensável
f_c	Resistência à compressão
f_t	Resistência à tração
E_c	Módulo de deformação estático
RSMG	Resíduo de serragem de mármore e granito
cm	Centímetro
m^3	Metro cúbico
mm	Milímetro
MPa	Megapascal
m	Metro
Kg	Quilograma
f_{c28}	Resistência à compressão aos 28 dias
CP	Cimento Portland
C_3A	Aluminato tricálcico
C_4AF	Ferroaluminato tetracálcico
CP II	Cimento Portland Composto
C_2S	Silicato dicálcico
A.P.I.	Adições predominantemente inertes
A.P.R	Adições predominantemente reativas
μm	Micrômetro
a/c	Relação água/cimento
a/f	Relação água/finos
LSM	Sulfonato de Melamina
CAD	Concreto de alto desempenho
CAR	Concreto de alta resistência
SNF	Sulfonatos de naftaleno-formaldeído condensados
SMF	Sulfonatos de melamina-formaldeído condensados

SC	Éteres policarboxilatos
sp/c	Relação do superplastificante em relação à massa de cimento
f/c	Relação do filer em relação à massa de cimento
V_{ar}	Volume de ar incorporado ao concreto
V_g	Volume de agregado graúdo
V_a	Volume de agregado miúdo
K_{sf}	Constante equivalente à parcela de areia com dimensão menor que 75 µm
G_m	Área de espalhamento relativa
d	Diâmetro medido após o espalhamento da argamassa
d_o	Diâmetro inicial
R_m	Tempo de escoamento relativo
ar/br	Relação areia/brita
f/c	Relação filer/cimento
ml	Mililitro
log T	Logaritmo do tempo
T₁₁₅	Tempo para a pasta atingir um diâmetro de 11,5 cm
s	Segundo
T₅₀	Tempo para o concreto alcançar um diâmetro de 50 cm
TL₂₀	Tempo de fluxo para o concreto alcançar um comprimento horizontal de 20 cm
TL₄₀	Tempo de fluxo para o concreto alcançar um comprimento horizontal de 40 cm
H₂/H₁	Relação final entre as alturas do concreto no final do trecho horizontal e a altura do concreto remanescente do trecho vertical da caixa
h	Altura
f_{c,cyl}	Resistência à compressão obtida a partir de c.p. cilíndricos
f_{cmédio}	Resistência média à compressão
f_c/f_t	Relação entre as resistências à compressão e à tração
σ	Tensão
ε	Deformação
μ	Massa específica
GPa	Gigapascal

SP	Superplastificante
SPC	Superplastificante policarboxilato
ε	Porosidade
S	Superfície específica
K	Constante do aparelho
η	Viscosidade
P_a	Peso do picnômetro
P_s	Peso do solo seco em estufa
P_{as}	Peso do picnômetro com o solo e água
γ_a	Massa específica da água
δ	Massa específica dos grãos de solo
V	Volume
m	Massa da amostra
m₂/m₁	Relação entre as massas das amostras 2 e 1
m₃/m₁	Relação entre as massas das amostras 3 e 1
R.S.	Razão de segregação
tf	Tonelada força
M_s	Massa seca
M_{sat}	Massa saturada
M_i	Massa imersa em água
A_{bs}	Absorção (%)
I.V.	Índice de vazios (%)
# 300 μm	Passante na peneira com malha de abertura de 300 μm
# 600 μm	Passante na peneira com malha de abertura de 600 μm
M.U.	Massa unitária
l	Litros
D_{final}	Diâmetro de espalhamento final
R.B.	Razão de bloqueio
T	Tempo
g	Gramas
cc	Consumo de cimento por metro cúbico de concreto
t_s	Teor de sólidos do aditivo
p/c	Relação plastificante/cimento

A_{plast}	Quantidade de água contida na solução do aditivo plastificante
A_i	Água inicial
A_c	Água de amassamento
C.C.	Concreto convencional
D.P.	Desvio Padrão
C.V.	Coeficiente de Variação
CAA38	Concreto auto-adensável com 38 % de volume de pasta
CAA40	Concreto auto-adensável com 40 % de volume de pasta
CAA42	Concreto auto-adensável com 42 % de volume de pasta
CP-Z-32	Cimento portland composto pozolânico
f_{cj}/f_{c28}	Relação entre as resistências à compressão na idade j e aos 28 dias
R²	Coeficiente de correlação
exp	Função exponencial
f_{tj}/f_{t28}	Relação entre as resistências à tração para uma idade j e aos 28 dias
ln	Função logarítmica
f_{cj}/f_{tj}	Relação entre as resistências à compressão para uma idade j e à tração para uma idade j.
f_{c7}/f_{c28}	Relação entre as resistências à compressão aos 07 dias e 28 dias
f_{td}	Resistência à tração direta
E_{cj}	Módulo de deformação longitudinal para uma idade j

O concreto auto-adensável (CAA) já é utilizado em vários países e representa um dos maiores avanços na tecnologia do concreto das últimas décadas. Seu nome está relacionado com o aumento na produtividade, melhora do ambiente construtivo e contribuição da tecnologia sustentável do concreto, sendo caracterizado como um material ambientalmente amigável, e podendo ser obtido com altos volumes de resíduos industriais. Como seu desempenho está mais associado às suas propriedades no estado fresco, estudos de propriedades mecânicas, como: resistências à compressão (f_c) e à tração (f_t) e o módulo de deformação longitudinal (E_c), assim como sua evolução e relações entre as mesmas, têm sido pouco desenvolvidos. Dos procedimentos que antecedem a determinação das propriedades mecânicas do concreto, a moldagem dos c.p. com CAA é a única modificada, pois, o adensamento do concreto não necessita de vibração. Dentro deste enfoque, um concreto auto-adensável com a adição mineral do resíduo de serragem de mármore e granito (RSMG) é produzido, e suas propriedades mecânicas são determinadas e comparadas com as de um concreto convencional e de outros CAA. Diferentes métodos de moldagem em c.p. cilíndricos com o CAA também são analisados, a fim de verificar sua auto-adensabilidade. O estudo comprova que a melhor forma de preenchimento dos moldes com CAA é semelhante ao adotado para concretos convencionais, a menos do processo de vibração. Equações de evolução de f_c e relações $f_c \times f_t$ e $f_c \times E_c$ para CAA também são obtidas e comparadas com as apresentadas para concreto convencional. Os resultados comprovam que as relações usadas para concreto convencional são aceitas para o CAA.

Palavras-chave: Concreto auto-adensável; resíduo (filer); propriedades mecânicas.

The Self-compacting concrete (SCC) is already in use in several countries and represents one of the biggest advances in concrete technology in the last decades. Its name is related to the growth of productivity, the improvement on constructive environment and the contribution of sustainable concrete technology that is characterized as an environment-friendly material, obtained with high volumes of industrial waste. As its development is characterized mainly by its properties in its fresh stage, the studies of its mechanical properties, such as compressive strength (f_c), diametral compressive strength or traction strength (f_t), and the modulus of elasticity (E_c), as its evolution and relations between each other have been little developed. The c.p's molding procedures with SCC is only modified, since the self-compacting concrete doesn't need any vibration. Within that focus, a SCC added with marble and the filler RSMG is produced, and its mechanical properties are determined and compared with a conventional concrete of reference and others SCC. The c.p. molding is also analyzed in order to verify its compactibility. The study prove that the best way to fill the mold, is similar to the one used for the reference conventional concrete, except the process of vibration. Equations of the evolution of f_c and relations between $f_c \times f_t$ e $f_c \times E_c$ to SCC are also accomplished and compared with the ones presented for conventional concrete. The results proved that the equations used of conventional concrete are accepted for the SCC.

Key-words: Self-compacting concrete (SCC); filler; mechanical properties.

Introdução

1.1. Considerações iniciais

A técnica de compactação do concreto em elementos estruturais é considerada uma etapa fundamental na construção civil. Tal prática garante ao concreto uma estrutura mais homogênea, com menos vazios, proporcionando uma melhor resistência e durabilidade. Técnicas de compactação do concreto têm sido desenvolvidas nos últimos anos, mas o processo ainda é bastante complicado quando as estruturas são de difícil acesso, com formas complexas e alta densidade de armaduras. Portanto, técnicas de compactação eficientes e mão-de-obra qualificada são pré-requisitos necessários para uma boa compactação do concreto em elementos estruturais, a fim de garantir suas propriedades desejadas no estado endurecido (MELO apud NUNES, 2001).

Segundo Okamura (1999), no Japão, o desenvolvimento de concretos especiais, como os chamados concretos auto-adensáveis (CAA), foram necessários para garantir estruturas mais duráveis, uma vez que o mercado apresentava carência de mão-de-obra qualificada e de equipamentos adequados para atender às exigências das estruturas com elevada taxa de armadura, visto que tais estruturas são comuns devido aos abalos sísmicos no país. Os estudos sobre o CAA tiveram início em 1986, na Universidade de Tóquio, com seu primeiro protótipo em 1988 (OKAMURA e OUCHI, 1999).

As principais características do CAA são: capacidade de preenchimento nas formas e passagem entre os obstáculos, por ação exclusiva do seu peso próprio, ou seja, sem a aplicação de forças externas para o seu adensamento. Assim, considera-se que o CAA garante o preenchimento das formas de maneira uniforme e com o mínimo de vazios, não prejudicando seu desempenho. No âmbito da aplicação do CAA em elementos estruturais, este apresenta várias vantagens, tais como: dispensa os processos de vibração para compactação, evitando assim ruídos; aumenta a produtividade e melhora o ambiente de trabalho (GOMES, 2002). Além disto, o CAA por necessitar de uma alta quantidade de finos em sua composição,

tem estimulado o uso de resíduos industriais como adições minerais, contribuindo assim para a diminuição do impacto ambiental. Neste sentido, o concreto auto-adensável (CAA) vem se mostrando um material com ótimas características para o desenvolvimento tecnológico ambientalmente amigável do concreto (LISBOA, 2004).

Mesmo considerando que as misturas de CAA contenham os mesmos componentes que os concretos convencionais, existem diferenças verificadas no comportamento reológico do CAA com relação ao concreto convencional, e em suas propriedades no estado fresco, que garantem a sua alta resistência à segregação e deformabilidade. No entanto, é importante constatar que essas características são alcançadas pelo uso de aditivos, minerais e químicos, diferentemente dos concretos convencionais. A presença de aditivos é indispensável na produção do CAA, tais como: aditivos minerais, como a sílica ativa, a cinza volante, a escória de alto-forno, as pozolanas, a cinza da casca-de-arroz, o resíduo de serragem de mármore e granito, dentre outros; e aditivos químicos, como os superplastificantes e modificadores de viscosidade.

Com base nas diferenças existentes entre as propriedades frescas do CAA e dos concretos convencionais, é necessário verificar quais as modificações que tais diferenças irão provocar nas propriedades do concreto no estado endurecido, bem como no seu controle tecnológico e estudo de evolução destas propriedades, como segue: resistência à compressão, resistência à tração, resistência à fadiga, módulo de deformação longitudinal, retração, fluência, ductilidade, tenacidade, aderência, dentre outros.

Já existe uma larga experiência adquirida ao longo dos anos com relação às propriedades mecânicas do concreto convencional. Em contrapartida, estudos de propriedades mecânicas do CAA ainda se apresentam com resultados bastante restritos e controversias, bem como um procedimento normalizado de moldagem em c.p. de CAA para verificação de suas propriedades (KLUG et al., 2003).

Atualmente, o CAA vem sendo bastante utilizado em vários países, principalmente no Japão e países da Europa. Já no Brasil, o uso do CAA ainda é muito incipiente, com poucos registros de utilização. Isto ocorre por vários motivos, dentre eles: falta de confiabilidade nos métodos de dosagem existentes, grande diversificação de materiais existentes no mercado, falta de normalização de procedimento de ensaios e pouco conhecimento do comportamento do CAA com relação às suas propriedades.

1.2. Relevância do tema

O CAA representa uma evolução na tecnologia do concreto, podendo ser utilizado em qualquer tipo de estrutura, e capaz de apresentar benefícios econômicos (aumento da produtividade e redução de custos); tecnológicos (permitem estruturas com formas complexas e/ou altas taxas de armaduras); e ambientais (melhora do ambiente de trabalho e contribuição para diminuição do impacto ambiental) para a tecnologia sustentável do concreto. Atualmente, conhecendo tais vantagens, várias pesquisas têm sido desenvolvidas buscando o conhecimento e a obtenção do CAA.

Suas principais características de auto-adensabilidade são: alta fluidez, passagem entre obstáculos sem bloqueio e resistência à segregação. As propriedades do CAA no estado fresco, por serem decisivas para sua aplicação na obra, são analisadas com muito mais frequência do que suas propriedades no estado endurecido, que garantem o atendimento do CAA as solicitações estabelecidas em projeto. Isso tem criado certa insegurança na utilização deste material, aumentada pela falta de normalização de procedimentos de ensaios e de confiabilidade nos métodos de dosagem existentes para o CAA, o que faz com que surjam novas pesquisas direcionadas para o estudo das propriedades mecânicas e procedimentos de ensaios.

Para a obtenção do CAA, além da presença de aditivos químicos (superplastificantes), o uso de uma alta quantidade de finos (aditivos minerais) em suas misturas permite o alcance das propriedades de auto-adensabilidade. Em geral, os aditivos minerais utilizados são os resíduos industriais. A utilização de tais resíduos na composição do concreto tem crescido em vários países, proporcionando ao concreto melhores desempenhos nos estados fresco e endurecido, o qual tem despertado o interesse também em centros de pesquisa, universidades, pesquisadores, dentre outros.

Dentro deste enfoque, a Universidade Federal de Alagoas (UFAL), através dos pesquisadores do Laboratório de Estruturas e Materiais (LEMA) do Núcleo de pesquisas Tecnológicas (NPT), vem estudando a viabilidade do uso de resíduos industriais em compósitos à base de cimento, a fim de minimizar os impactos ambientais provocados pelos mesmos ao serem lançados no meio ambiente.

Nesse contexto, esse trabalho apresenta uma continuidade do trabalho de Lisboa (2004), como uma contribuição ao estudo de propriedades do concreto auto-

adensável com a adição mineral do resíduo da indústria de serragem de mármore e granito da cidade de Maceió (RSMG), como uma alternativa de aproveitamento, visando contribuir para o desenvolvimento sustentável da tecnologia do concreto.

O resíduo industrial do beneficiamento de pedras ornamentais tem sido o alvo de diversos estudos desenvolvidos nesta área, por ser gerado em grandes proporções e destinação não definida. Esse resíduo, na maioria das indústrias de pedras ornamentais, é gerado a partir da serragem de grandes blocos de pedra, polimentos ou cortes das chapas. A Figura 01 (a) ilustra os blocos de pedras graníticas, que são serrados a partir de equipamentos conhecidos como teares. Já a Figura 01 (b) ilustra a lama do RSMG depositado a céu aberto, em fase madura.

Na serragem, cerca de 25 % a 30 % do bloco são transformados em pó e depositados em pátios das empresas. No Brasil, a quantidade estimada da geração conjunta deste resíduo é de 240.000 toneladas/ano, distribuídas entre Espírito Santo, Bahia, Ceará, Paraíba, entre outros estados (INFORMATIVO TÉCNICO, 2002).



Figura 01 (a) – Blocos de pedras graníticas (b) – Lama do RSMG à céu aberto.

Nos últimos quinze anos, essas indústrias vêm sendo citadas pelos ambientalistas como fontes de contaminação e / ou poluição ao meio ambiente, devido à enorme quantidade de resíduos gerados e freqüentemente lançados diretamente nos ecossistemas, sem nenhum processo de tratamento para eliminar ou reduzir os constituintes presentes (NEVES, 2002). A eliminação dos resíduos industriais gerados por empresas mineradoras é um dos grandes desafios deste

século. Em vários países vêm sendo desenvolvidas pesquisas sobre reciclagem de resíduos.

O estudo das propriedades do CAA está mais associado ao estado fresco. Já suas propriedades mecânicas, como: resistências à compressão (f_c) e à tração (f_t) e o módulo de elasticidade (E_c), têm sido pouco analisadas (KLUG, 2003).

1.3. Objetivos

O objetivo principal deste trabalho é analisar algumas propriedades mecânicas do CAA, como: f_c , f_t e E_c , utilizando em sua composição um resíduo industrial local das fábricas de pedras ornamentais, o resíduo de serragem de mármore e granito (RSMG), visando sua aplicação em elementos estruturais. Para alcançar tal objetivo geral, algumas etapas específicas foram desenvolvidas, tais como:

- Melhorar as propriedades do concreto auto-adensável com RSMG # 300 μm , ao invés do RSMG # 600 μm , utilizado por Lisboa (2004).
- Verificar a capacidade de auto-adensabilidade do CAA.
- Determinar um procedimento de moldagem do CAA em corpos-de-prova cilíndricos (c.p.) de 10 cm de diâmetro x 20 cm de altura e 15 cm de diâmetro x 30 cm de altura.
- Analisar algumas propriedades do CAA no estado endurecido.
- Estudar a evolução destas propriedades mecânicas para CAA.
- Estudar as relações $f_t \times f_c$ e $E_c \times f_c$ para CAA.

1.4. Síntese dos Capítulos

Os diferentes capítulos da dissertação são brevemente descritos da forma a seguir. A dissertação é composta de 7 capítulos. Onde o Capítulo 1 retrata uma pequena introdução, relevância do tema, objetivo e apresentação do trabalho.

No Capítulo 2 é apresentada uma revisão bibliográfica do concreto auto-adensável, tratando de sua origem, definição, vantagens, aplicações, suas propriedades no estado fresco e endurecido, dos materiais e proporções das misturas, da descrição de alguns métodos de dosagem e alguns fundamentos sobre o resíduo utilizado na pesquisa.

O Capítulo 3 apresenta as principais propriedades dos materiais utilizados e os procedimentos e equipamentos dos métodos de ensaios utilizados no estudo. Já

o Capítulo 4 apresenta a metodologia utilizada para a produção dos concretos auto-adensável e convencional, além de suas propriedades no estado fresco.

No Capítulo 5 são apresentadas as propriedades mecânicas do CAA e do concreto convencional, tais como: resistência à compressão e à tração e módulo de deformação longitudinal, assim como a evolução das propriedades do CAA, obtidas com os dados experimentais e de outros autores, e as relações empíricas experimentais entre $f_t \times f_c$ e $E_c \times f_c$ dos dados obtidos e de outros trabalhos da literatura, bem como de algumas normas regulamentadoras.

O Capítulo 6 apresenta as conclusões e recomendações para os próximos trabalhos a serem desenvolvidos nesta área.

Finalizando, o Capítulo 7 apresenta as referências bibliográficas.

Concreto auto-adensável

2.1. Origem e definição

Segundo Okamura (Japão), nos anos 80, devido à reduzida mão-de-obra qualificada e a falta de equipamentos sofisticados para a realização do adensamento mecânico do concreto, em formas complexas e/ou com alta densidade de armaduras, geralmente necessárias para resistir aos abalos sísmicos locais existentes, problemas de durabilidade começaram a surgir nas estruturas de concreto. Durante vários anos os estudos de durabilidade foram os principais tópicos de pesquisas em vários centros de investigação desse país (BILLBERG, 1999; NUNES, 2001).

A partir de 1983, na Universidade de Tóquio, o Prof. Okamura, com o objetivo de minimizar tal problema, iniciou seus estudos buscando obter um concreto especial capaz de se adensar sem a necessidade de nenhum tipo de vibração mecânica, dando origem a um concreto denominado auto-adensável, onde seu primeiro protótipo foi realizado em 1988 (OKAMURA, 1997; GOMES, 2002). Após uma década de utilização no Japão, o CAA surge na Europa em meados dos anos 90, mais precisamente na Suécia e na Holanda, onde foi empregado em aplicações de concreto “in loco” (OKAMURA e OUCHI, 1999). Segundo Gomes (2002), este concreto especial teve rápida aceitação no mercado europeu.

A entidade europeia EFNARC (European Federation of National Trade Associations Representing Producers and Applicators of Specialist Building Products), foi fundada em março de 1989 e descreve o CAA como o maior desenvolvimento da construção em estruturas de concreto nas últimas décadas.

Entende-se por concreto Auto-Adensável (CAA) o concreto capaz de preencher os espaços vazios das formas e se auto-adensar apenas sofre o efeito da gravidade. O CAA é caracterizado pela grande capacidade de fluxo sem segregação. O concreto para ser considerado como auto-adensável tem que satisfazer determinadas propriedades no estado fresco, tais como: preencher todos os espaços das formas sobre o efeito apenas do seu peso próprio; passar entre os

obstáculos sem sofrer bloqueio; e manter a estabilidade, sem sofrer segregação e/ou exsudação de seus componentes. (SKARENDAHL e PETERSSON, 2000; EFNARC, GOMES e ROONEY, 2002).

2.2. Vantagens e aplicações

A partir do final dos anos 90, verifica-se um crescimento na utilização do CAA em diversos tipos de elementos estruturais, principalmente, em pré-fabricados, reparos e reforços estruturais (OKAMURA e OUCHI, 1999). Isso foi resultado de inúmeras pesquisas e estudos desenvolvidos em diversos centros de vários países, que investigaram sua auto-adensabilidade e as várias vantagens do CAA, dentre elas, podem ser citadas (CAMARGOS, EFNARC e BUI, 2002):

- redução do custo de aplicação por m³ de concreto;
- garantia de excelente acabamento em concreto aparente;
- otimização da mão-de-obra;
- maior rapidez durante a execução da obra, devido à redução no tempo de concretagem;
- melhoria nas condições de segurança na obra;
- eliminação do ruído provocado pelo vibrador;
- permite bombeamento em grandes distâncias horizontais e verticais;
- eliminação da necessidade de espalhamento e de vibração;
- possibilidades de trabalho com formas complexas e de pequenas dimensões;
- melhoria das condições de trabalho;
- permite o uso de grande volume de aditivos minerais provenientes de resíduos industriais, contribuindo para diminuição do impacto ambiental.
- redução do custo final da obra em comparação ao sistema de concretagem convencional.

Apesar de existirem aplicações práticas do CAA em obras de concreto armado, bem como a grande quantidade de estudos realizados nesta área, a prática de sua aplicação ainda é bastante restrita. Segundo Okamura e Ouchi (2003), a sua aplicação no Japão corresponde a 0,15 % do concreto usinado empregado no Japão, e 0,55 % em pré-fabricados. Embora já existam aplicações do CAA em diversos países, onde se destacam àquelas encontradas no Japão e em países da Europa, sua utilização ainda é muito limitada e ainda bastante direcionada para

estudos experimentais. (OKAMURA e OUCHI, 2003). Algumas aplicações práticas do CAA em elementos estruturais são apresentadas na literatura técnica. Como exemplos, podem-se citar:

A construção da ponte Akashi Kaikyo, no Japão (Figura 02), onde foram utilizados 500.000 m³ de CAA, em seus dois blocos de ancoragem, tendo alcançado um rendimento de aplicação de 1900 m³ / dia. O uso do CAA proporcionou uma diminuição no prazo de entrega da obra em aproximadamente três meses (OKAMURA, 1997 apud GOMES, 2002).



Figura 02 – Bloco de ancoragem da ponte Akashi Kaikyo, no Japão.

O túnel construído em Yokohama, no Japão, Figura 03, com três metros de diâmetro e um quilômetro de comprimento, onde foram utilizadas duas camadas de aço protendido, preenchidas com CAA, numa aplicação de 40 m³ (TAKEUCHI et. al., 1994 apud GOMES, 2002).



Figura 03 – Ilustração do túnel em Yokohama, no Japão.

A execução de grandes tanques de gás líquido, em Ozaka, no Japão, onde o tipo de fino utilizado foi o filer-calcário e o agregado graúdo com diâmetro máximo de 20 mm. O espalhamento final ficou em torno de 65 cm. Com o uso do CAA, houve redução de quatro meses no tempo previsto para execução da obra, e, o número de trabalhadores que era de 150 pôde ser reduzido para 50 (PETERSON, 2000).

O túnel de aproximadamente 6000 metros de extensão, no Chile, com três diferentes diâmetros, variando de 2,5 a 3,0 metros, para uma média de profundidade de 9 metros. A escavação do túnel foi reforçada com placas metálicas. O concreto utilizado na obra tinha resistência à compressão de 30 MPa, relação água/cimento (a/c) $< 0,55$ e consumo de cimento $> 320 \text{ Kg/m}^3$ de concreto (SCIARAFFIA, 2003).

A fundação de um cais para sustentação de um moinho localizado em Milão, na Itália, com dimensões de 14 m de comprimento x 10 m de largura x 4 m de profundidade, totalizando um volume superior a 500 m^3 . As armaduras detalhadas no projeto de estruturas eram bastante densas, com diâmetros de 26 mm (PARIS et al., 2003).

Em três pontes construídas na Suécia. A primeira delas construída no início de 1998. Foi a primeira ponte fora do Japão onde a estrutura inteira foi executada com CAA. Também foi construído um túnel com aproximadamente 150 m de extensão, durante o período de dezembro de 1999 a junho de 2000 (BILLBERG, apud GOMES, 1999).

Uma base de fundação para um grande reservatório de peixes, no jardim zoológico de Rotterdam. As paredes eram bastante reforçadas, com espessuras de 25 cm e 30 cm, e altura de 7 m, a fim de absorver os esforços provocados por grandes aberturas de vidro para visibilidade dos espectadores (WALRAVEN, 2003).

Pode-se constatar também o crescimento acentuado do uso de CAA em obras de reparos, como por exemplo, de uma ponte no Reino Unido, onde o CAA atingiu aos sete dias uma resistência à compressão média de 60 MPa (MCLEISH apud GOMES, 2002). Na Suíça, também foi utilizado o CAA na recuperação de uma ponte, onde a resistência à compressão média atingiu 40 MPa aos 28 dias, como mostra a Figura 04 (CAMPION e JOST, 2000 apud GOMES, 2002).



Figura 04 – Recuperação de uma ponte, na Suíça.

O uso do CAA no campo de elementos pré-fabricados vem também ganhando espaço, devido às várias vantagens proporcionadas a esta técnica de confecção de peças de concreto, por exemplo: redução no consumo de energia, aumento da produtividade, melhora do ambiente de trabalho e melhora no acabamento dos pré-fabricados.

No Brasil, existem poucos registros da utilização do CAA em estruturas de concreto. Recentemente, foi utilizado em Goiás, na estrutura de um condomínio composto de três edifícios residenciais de sete pavimentos, totalizando 72 apartamentos. Toda a estrutura (pilares, lajes e vigas) foi executada com o CAA, com a especificação de f_{c28} de 20MPa. Hoje, outras obras em Goiânia e no sul do Brasil já utilizam o CAA (INFORMATIVO TÉCNICO, 2005).

Com relação aos custos, apesar do CAA apresentar um acréscimo no custo dos materiais, que, segundo Juvas (2004) é de 15 a 25 % em relação ao concreto convencional, a redução dos custos no final da estrutura é de 5 a 15 %. Walraven (2003) afirma que há uma redução em torno de 10 % no consumo de energia, devido à eliminação da vibração; redução em torno de 10 % nos custos de manutenção; e redução de doenças causadas aos trabalhadores na obra em torno de 10 %.

2.3. Materiais e proporções das misturas

O CAA é constituído pelos mesmos materiais utilizados na produção de concretos convencionais: aglomerante (cimento), agregados (areia e brita) e água;

com exceção dos aditivos químicos e minerais. A seguir serão apresentadas as principais recomendações dos materiais mais comumente utilizados na produção do CAA.

2.3.1. Cimento

Em geral não existe um cimento específico para o CAA. No entanto, é utilizado o cimento portland (CP), tipo bastante produzido e facilmente comercializado. Porém, alguns estudos têm recomendado um cimento com alguns ajustes, levando em consideração a composição da mistura do CAA, como segue:

A adsorção do aditivo superplastificante pelas partículas do cimento ocorre preferencialmente nos aluminatos (Aluminato tricálcico - C_3A e Ferroaluminato tetracálcico - C_4AF). No entanto, a quantidade destes compostos deve ser moderada, para que ocorra uma adsorção mais uniforme. O teor de C_3A em massa deve ser inferior a 10 % (EFNARC, 2002).

O cimento portland composto, CP II, por ser o tipo de cimento mais utilizado, ser facilmente encontrado no Brasil, e sua composição se encontrar dentro do especificado pela EFNARC, o mesmo se apresenta como o mais indicado para a utilização em concretos auto-adensáveis. Segundo Mehta e Monteiro (1994), o limite máximo de C_3A (Aluminatos tricálcicos), em geral, é de 8 %.

O CAA apresenta geralmente em sua composição uma grande quantidade de finos, o que gera um alto volume de pasta e reduzido volume de agregado graúdo. No entanto, um grande volume de pasta necessita de uma grande quantidade de cimento, gerando assim alto custo e alto calor de hidratação no concreto. Para contornar tal situação, são utilizados fileres e/ou pozolanas para substituir parte do cimento. No entanto, cimentos à base de belita (forma impura do C_2S , que, quando utilizado em maiores proporções no cimento, torna-o bem menos reativo, liberando assim menor calor de hidratação) vêm sendo utilizados para reduzir a grande geração de calor produzida pela grande quantidade de cimento utilizada no CAA (GOMES, 2002). Segundo Neville (1997), os cimentos mais finos apresentam maior contribuição para o ganho de resistência, devido a uma maior velocidade de hidratação do cimento.

De acordo com os trabalhos técnicos da literatura, é observado um consumo mínimo de cimento de 350 kg/m^3 e um máximo de 550 kg/m^3 para a obtenção do

CAA (KHAYAT, HU e MONTY, 1999; ERNARC e GOMES, 2002; WESTERHOLM, 2003; LISBOA, 2004).

2.3.2. Agregados

A obtenção das propriedades de auto-adensabilidade do CAA exige misturas com elevado volume de pasta e reduzido volume e dimensão máxima característica do agregado graúdo. Algumas recomendações para os agregados de CAA são apresentadas na literatura, tais como:

a) O volume de agregado miúdo é fixado em 40 % do volume de argamassa. Já para o agregado graúdo, a sua quantidade utilizada no concreto deve ser 50 % do volume de sólidos (OKAMURA, 1997 apud GOMES, 2002).

b) Os agregados devem satisfazer às exigências da EN 12620. Geralmente são utilizados agregados graúdos com dimensão máxima entre 16 mm e 20 mm. Para o agregado miúdo, todas as areias podem ser utilizadas, contanto que isenta de agentes nocivos e impurezas. É importante salientar a necessidade de se fazer um controle de umidade dos agregados para a obtenção de uma CAA com composição uniforme (EFNARC, 2002).

2.3.3. Aditivos minerais

Os aditivos minerais, também conhecidos como adições minerais, são materiais finamente moídos, que são incorporados ao concreto com a finalidade de se obter características específicas. Estes são geralmente utilizados em grandes quantidades, com a finalidade de reduzir os custos, melhorar a trabalhabilidade do concreto no estado fresco, podendo até melhorar a sua resistência à fissuração térmica, à expansão álcali-agregado e ao ataque por sulfatos (MEHTA e MONTEIRO, 1994).

O uso de resíduos industriais como materiais finos, em pastas, argamassas e concretos, geralmente proporcionam uma melhora das suas propriedades nos estados fresco e endurecido (GOMES, 2002). Atualmente, motivados por tais resultados, o uso de resíduos provenientes de indústrias têm sido também indicador para seu uso no concreto.

As adições podem ser classificadas como predominantemente inertes (A.P.I.) ou predominantemente reativas (A.P.R.), de acordo com a sua ação no concreto. As A.P.R. contribuem para a formação dos hidratos, como: pozolanas, cinza volante,

cinza da casca de arroz, cinzas da caldeira da queima do bagaço da cana de açúcar, sílica ativa e metacaulin. Já as A.P.I. provocam uma ação física, proporcionando uma estrutura com maior compacidade. Alguns exemplos são os fíleres de calcário, quartzo, e o resíduo de serragem de mármore e granito (RSMG). Segundo a EFNARC (2002), os dois tipos de adições podem ser utilizados na produção do CAA.

Segundo Mehta e Malhotra (1996), os principais benefícios alcançados com a utilização de adições minerais são: ambiental, quando a adição é um resíduo industrial, pois evita que o material seja lançado ao ambiente sem nenhuma finalidade benéfica; econômico, devido à substituição parcial do cimento, o que reduz o consumo de cimento, e conseqüentemente, o custo do m³ do concreto; e tecnológico, pela melhora das propriedades do concreto nos estado fresco e endurecido. Nas propriedades frescas, com relação à fluidez, quantidade de água e ausência de segregação e/ou exsudação. E nas propriedades do concreto no estado endurecido, pela melhora nas propriedades mecânicas, tais como: resistência, permeabilidade e durabilidade, provocada pelo aumento da quantidade de finos e do refinamento dos poros.

A caracterização e seleção dos materiais utilizados no CAA, com uma grande quantidade de finos para preenchimento dos vazios existentes, é uma grande contribuição para a fluidez do material ESPING (2003).

Com a necessidade do alto teor de finos para a produção do CAA, o uso de adições minerais é importante, tendo em vista os seguintes fatores:

- Contribui para a diminuição da dosagem do cimento;
- Reduz o calor de hidratação e evita a presença de fissuras internas no concreto;
- Melhora o comportamento da microestrutura do concreto, preenchendo assim os poros de menor escala e aumentando a viscosidade, o que reduz a fricção entre os agregados, e conseqüentemente, aumenta a resistência à segregação e/ou exsudação.

Das propriedades relacionadas a dimensões dos grãos dos finos, uma que se destaca é a superfície específica. Segundo Nunes (2001), quanto maior a superfície específica dos finos, maior a viscosidade da mistura. No CAA, a dimensão das partículas das adições minerais utilizadas tem tido uma influência importante no alcance de suas propriedades. Khayat et al. (1999) afirma em seus estudos que finos com diâmetros médios da ordem de 80 µm acarretam numa melhor

viscosidade e coesão da mistura de CAA. Para Esping (2003), uma alta superfície específica, elevada quantidade de fíleres e agregados de pequena granulometria, são parâmetros essenciais para uma maior trabalhabilidade e um maior controle das propriedades do CAA.

Tragardh (1999) verifica em seu trabalho que um fator importante que apresenta uma grande influência na microestrutura do CAA é a grande quantidade de finos com diâmetros médios $< 125 \mu\text{m}$. Westerholm (2003) em seu trabalho constata que os resultados obtidos para as propriedades do CAA no estado fresco para finos são da ordem de $0 \mu\text{m} - 75 \mu\text{m}$ e $75 \mu\text{m} - 125 \mu\text{m}$ são bastante similares. Algumas misturas de CAA têm sido obtidas com um alto volume de materiais finos, da ordem de $150 \mu\text{m}$, geralmente provenientes de resíduos industriais, como escória de alto forno (BARTOS et al., 2000), pozolana natural, cinzas volantes e sílica ativa ou fíler de rochas como calcário (SAKATA et al., 1995) e de mármore e granito (LISBOA et al., 2004).

Entretanto, a dimensão adequada dos grãos dos finos para a produção do CAA varia de um autor para outro. Gomes (2002) os limita a $100 \mu\text{m}$, Okamura (2003) a $90 \mu\text{m}$, Izquierdo e EFNARC (2002) a $125 \mu\text{m}$, dentre outros. Essa definição deve ser analisada com bastante cuidado, já que afeta diretamente a relação a/f, ou seja, água com relação aos finos (cimento + adições), que é um parâmetro muito utilizado na dosagem do CAA. Nenhum autor indica diferenças entre as distintas frações desses finos, mas recomendam que a relação a/f se encontre entre 0,9 e 1,1 (EFNARC, 2002).

A adição mineral utilizada neste trabalho para a produção do CAA é o resíduo de serragem de mármore e granito, que será comentada com mais detalhes logo a seguir.

· Resíduo de serragem de mármore e granito (RSMG)

A indústria de mineração e beneficiamento de granitos é uma das áreas promissoras de negócios do setor mineral, apresentando um crescimento médio na produção mundial estimado em 6 % a.a., nos últimos dez anos, e com uma comercialização de materiais brutos e produtos acabados/semi-acabados que movimenta em torno de US\$ 6 bilhões/ano, no mercado internacional. O Brasil possui grandes reservas de mármore e granitos com os mais variados aspectos estéticos. Dentre os estados produtores, destacam-se o Espírito Santo, Minas

Gerais, São Paulo, Mato Grosso do Sul, Rio de Janeiro, Bahia, Ceará e Paraíba (FILHO e RODRIGUES, 1999 apud NEVES, 2002).

As indústrias beneficiadoras de mármore e granito têm como principal atividade sua serragem e polimento para produção de rochas ornamentais, que são utilizadas na indústria da construção civil. O sistema de desdobramento de blocos de rochas para produção de chapas gera uma quantidade significativa de resíduos na forma de lama (polpa abrasiva). Tal material é proveniente da polpa utilizada nos teares, cujos objetivos são: lubrificar e resfriar as lâminas, bem como evitar sua oxidação de modo a impedir o aparecimento de manchas nas chapas. Essa polpa é geralmente, constituída de água, granalha e cal moída. Costuma-se utilizar outros materiais tais como: calcário moído, escória de alto-forno, etc., em substituição à cal (SILVA, 1998 apud NEVES, 2002).

Nos últimos quinze anos, essas indústrias vêm sendo citadas pelos ambientalistas como fontes de contaminação e / ou poluição do meio ambiente, devido à enorme quantidade de resíduos gerados e freqüentemente lançados diretamente nos ecossistemas, sem um processo de tratamento para eliminar ou reduzir os constituintes presentes (NEVES, 2002).

A eliminação dos resíduos industriais gerados por empresas mineradoras é um dos grandes desafios deste século. Em vários países vêm sendo desenvolvidas pesquisas sobre reciclagem de resíduos.

· Geração do resíduo

As empresas mineradoras de rochas ornamentais provocam impactos ambientais em três diferentes etapas. Primeira, grandes problemas hidrológicos, gerados pelo desmatamento na fase da pesquisa mineral. Em seguida, a geração de elevada quantidade de resíduos para a obtenção dos blocos com dimensões padronizadas, como mostra a Figura 05 (a). E por fim, a produção do resíduo na forma de polpa abrasiva, chamada de lama, como mostra a Figura 05 (b).

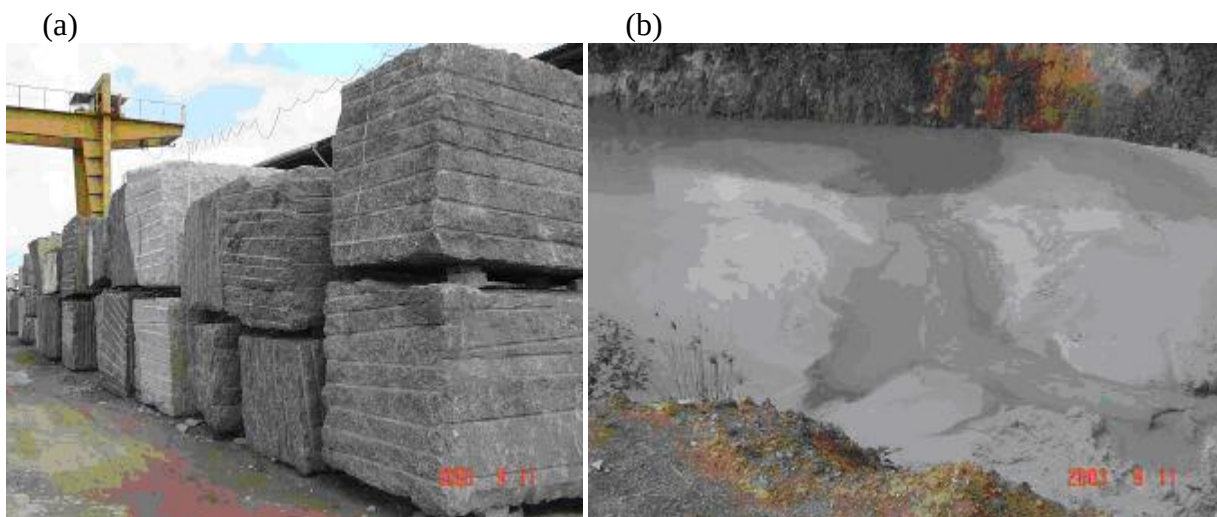


Figura 05 (a) – Blocos de pedras graníticas (b) – Resíduo na forma de polpa abrasiva (lama).

Os cortes dos blocos são feitos por equipamentos chamados teares (Figura 06), transformando-os em chapas. Esta fase é conhecida como desdobramento ou serragem do bloco de granito. A maior quantidade de resíduo é produzido nesta etapa.

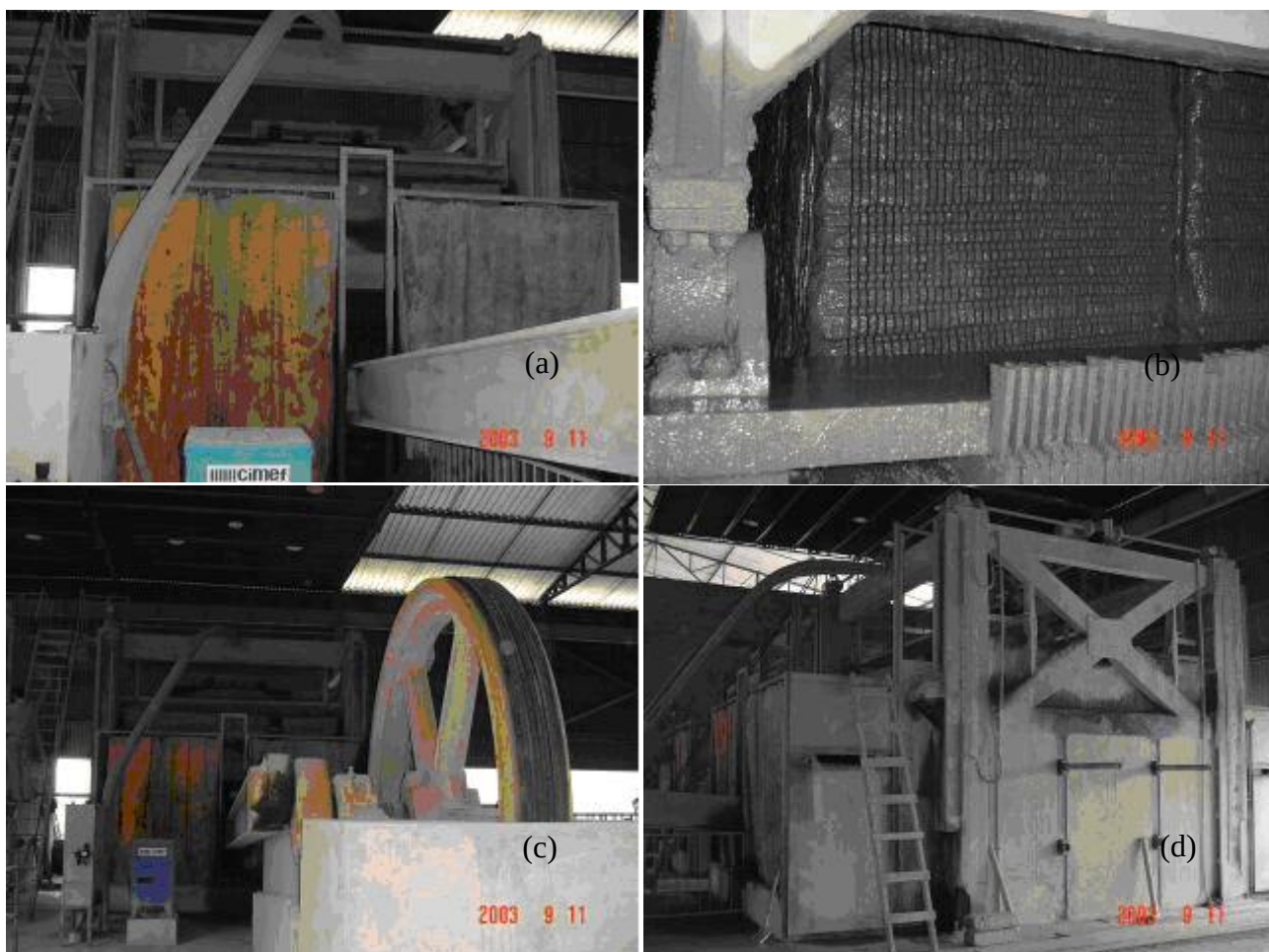


Figura 06 – Vistas dos teares na operação de cortes dos blocos.

Os teares são equipamentos robustos, constituídos por quatro colunas, que sustentam quadros que realizam movimentos pendulares. Nesses quadros, são dispostas lâminas de aço, na direção do sentido longitudinal do equipamento. As citadas lâminas são de aço carbono, de alta dureza e boa resistência mecânica, para melhor resistir aos esforços de tração e abrasão (SENAI, 1993 apud NEVES, 2002).

A mistura abrasiva é bombeada sobre os blocos de forma homogênea e contínua, em todas as lâminas (cerca de 100 lâminas constituem os teares, atualmente). Em geral, estes sistemas são constituídos de distribuidores multibraços, cada qual com bicos para a aspersão do fluido abrasivo (NEVES, 2002).

A polpa utilizada nos teares é geralmente constituída de água, gralha e cal moída ou calcário moído ou escória de alto forno, etc. A gralha tem função abrasiva no processo de corte.

No processo de serragem, pode-se perder até 30% dos blocos, na forma de costaneiras e lamas abrasivas. Outras perdas costumam ocorrer por quebra de placas, falhas de empilhamento, defeitos de corte, uso de polpa abrasiva de composição inadequada, lâminas de corte pouco tensionadas e blocos fraturados. Deve-se ressaltar que, durante a manufatura de ladrilhos, podem-se atingir perdas da ordem de 10 %. Finalmente, estima-se que quando da aplicação de pedras ornamentais na construção civil, as perdas podem alcançar a cifra de até 30 %, sem mencionar os rejeitos do polimento (NEVES, 2002).

Após o processo de corte e obtenção de chapas brutas, as mesmas são submetidas aos processos de acabamento para obtenção do produto final. O processo seguinte ao corte é o polimento da superfície superior (Figura 07). Nesta fase, a quantidade de resíduo gerado é muito menor que no processo de corte.

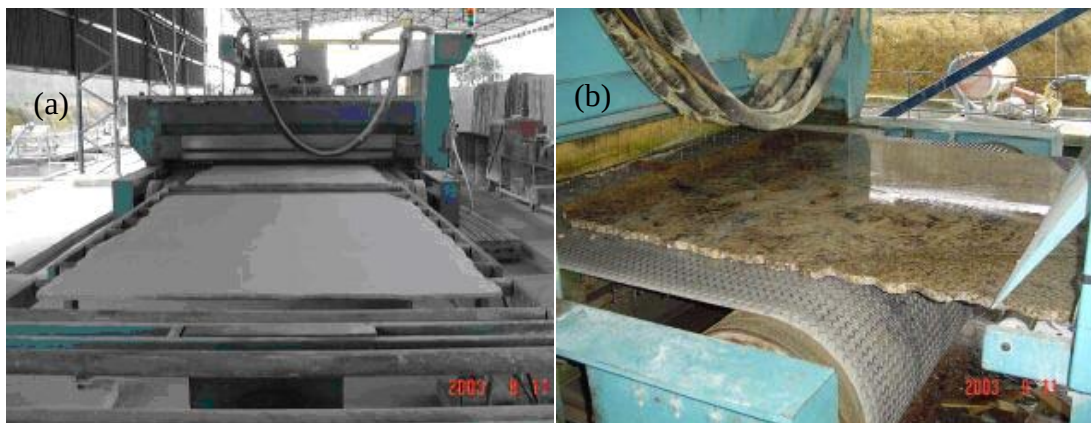


Figura 07 – Detalhe do polimento da superfície das chapas.

Durante o processo de polimento, o resíduo gerado segue através de canaletas de concreto para tanques cheios d'água (Figura 08). Quando os tanques se encontram relativamente cheios, o resíduo sem granalha, juntamente com a água, é bombeado para as lagoas se misturando com o resíduo do corte, com granalha.

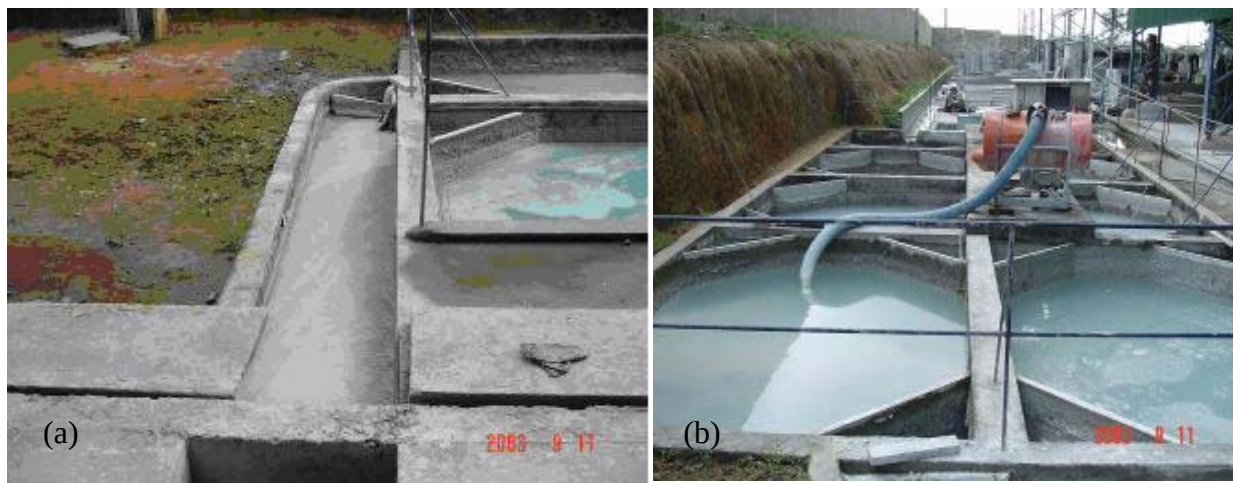


Figura 08 – Detalhe do destino do resíduo do polimento das chapas aos tanques

As lagoas que já atingiram seus níveis máximos de armazenamento sofrem um processo de evaporação da água, de forma que o resíduo fica acumulado em camadas úmidas, de acordo com a Figura 09 (a). Na superfície se forma uma camada de resíduo com acentuado processo de corrosão da granalha, de acordo com a Figura 09 (b).

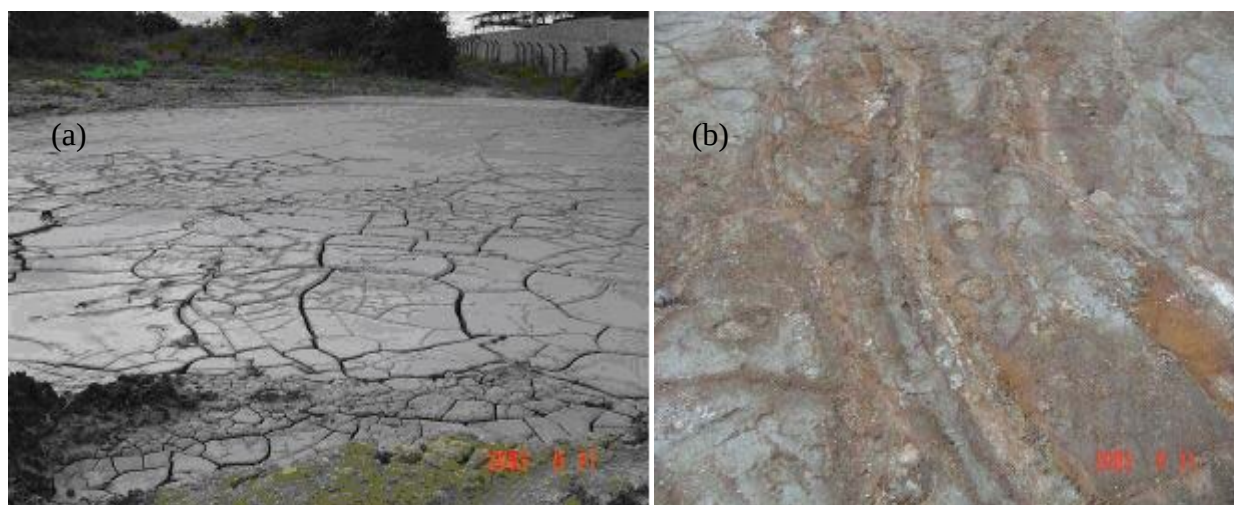


Figura 09 (a) - Detalhe da lagoa em sua fase madura (b) - Detalhe da camada corrosiva provocada pela presença da granalha.

2.3.4. Aditivos químicos superplastificantes

Os superplastificantes são aditivos conhecidos como redutores de água de alta eficiência, por serem capazes de reduzir o teor de água três a quatro vezes mais, para uma dada mistura, quando comparados aos aditivos plastificantes. São tensoativos de cadeia longa, massa molecular elevada e um grande número de grupos polares na cadeia do hidrocarboneto (MEHTA e MONTEIRO, 1994).

Comparados aos aditivos plastificantes, quantidades relativamente grandes de superplastificantes de até 1 % em relação à massa de cimento, podem ser incorporadas às misturas de concreto sem causar exsudação excessiva e retardamento do tempo de pega, apesar da consistência ser da ordem de 200 a 250 m de abatimento. É a dimensão coloidal das partículas de cadeia longa do aditivo, que, provavelmente, obstrui os canais de fluxo de água de exsudação no concreto, de modo que a segregação não é geralmente observada em concretos superplastificados. Uma excelente dispersão das partículas de cimento na água (Figura 10) parece acelerar a taxa de hidratação, conseqüentemente, o retardamento é raramente observado; em vez disso, é comum ocorrer a aceleração da pega e do endurecimento.

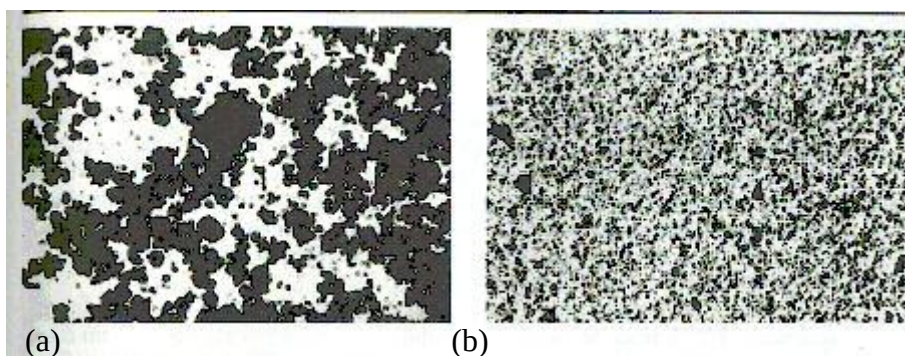


Figura 10 – Micrografia de partículas de cimento em uma solução água-cimento (a) - sem aditivo superplastificante (b) - com aditivo superplastificante (MEHTA e MONTEIRO, 1994).

A fim de melhorar algumas propriedades do concreto convencional, como por exemplo, a trabalhabilidade, para uma mesma relação a/c, são requisitados os superplastificantes ao sistema, para a obtenção de concretos especiais, como o concreto auto-adensável (CAA).

Os aditivos superplastificantes podem ser de dois tipos: os de 2ª geração, constituídos de polímeros sintéticos sulfonados, e os de 3ª geração, que são os

polycarboxilatos. Os polycarboxilatos, também conhecidos como poliacrilatos, são capazes de promover um efeito bastante eficiente na repulsão dos grãos de cimento.

Segundo Nunes (2001), os superplastificantes mais recomendados para a produção do CAA são os de 3ª geração, os polycarboxilatos, pois, permitem uma maior redução de água, maiores resistências iniciais, e manutenção de fluidez por um tempo prolongado, quando comparado aos aditivos superplastificantes de 2ª geração. A utilização dos aditivos redutores de água de última geração (superplastificantes), produzidos à base de polycarboxilatos, tem facilitado os avanços neste campo.

Hwang (2003) afirma que os aditivos superplastificantes à base de naftaleno apresentam maior consumo que os polycarboxilatos. Em contrapartida, outras pesquisas recomendam o uso dos aditivos superplastificantes de 2ª geração, à base de naftaleno. (KHAYAT, 2000; SAAK et al., 2001; BUI et al., 2002; ASSAAD et al., 2003).

A incorporação de superplastificante em pastas, argamassas e/ou concretos provoca alterações nas propriedades e características da mistura, tais como: hidratação, porosidade, morfologia dos hidratos, evolução da resistência, fluidez, tempo de pega, retração, segregação e/ou exsudação, dentre outras. Tais características podem ser influenciadas de forma positiva ou negativa na mistura. Para que estes efeitos provocados pela adição do superplastificante sejam satisfatórios, deve ser feito um estudo prévio de compatibilidade e uma adequada caracterização dos materiais empregados (RONCERO, 2000).

Um importante passo para a obtenção da dosagem do CAA está na determinação da dosagem do superplastificante em relação à massa de cimento (sp/c). Alguns estudos recomendam a sua determinação em pastas e/ou argamassas, nesta seqüência respectivamente, a fim de se determinar a dosagem ótima de saturação do superplastificante a ser utilizada no concreto, ou seja, o teor máximo de aditivo capaz de promover aumento da fluidez, pois, acima do qual alguns aspectos negativos podem ocorrer, tais como: segregação e/ou exsudação, fluidez insuficiente para a obtenção do CAA, perda de trabalhabilidade, dentre outros (GOMES, 2002).

2.3.5. Água

A quantidade de água a ser utilizada em pastas, argamassas ou concretos é definida a partir da relação a/c . Quanto maior a quantidade de água no concreto, menor é a tensão limite de escoamento, aumentando sua deformabilidade e diminuindo a viscosidade da mistura. No entanto, um elevado teor de água pode provocar segregação. Para garantir a grande fluidez do CAA, sem afetar negativamente as suas propriedades, parte da água pode ser substituída pelo aditivo superplastificante.

A relação a/f para o CAA pode apresentar valores diferenciados, de acordo com o método de dosagem adotado. Esses concretos são mais governados para a relação a/f do que a relação a/c . Gomes (2002) considera para CAA de alta resistência que a relação água/finos (a/f) deverá ser fixada, a princípio, no limite superior de 0,4.

O tipo de superplastificante utilizado, de 2ª ou de 3ª geração, é um parâmetro que influencia no fator a/c e a/f , visto que, estes aditivos químicos são responsáveis por reduzir a quantidade de água utilizada no concreto, mantendo a mesma trabalhabilidade.

Segundo Billberg (1999), a substituição de parte do cimento por resíduos industriais (finos) para a produção de CAA, acarreta numa redução de a/f , se mantida constante a relação a/c . Já para Okamura et al. (1999), a relação a/c deve estar compreendido entre 0,9 e 1,0, em volume, dependendo dos materiais utilizados na sua composição.

De acordo com alguns trabalhos apresentados na literatura com CAA, a relação a/c pode apresentar valores em torno de 0,3 a 0,5, em massa. (OUCHI, BILLBERG, DOMONE e JIN, 1999; EDAMATSU e GOMES, 2002; LISBOA, 2004).

2.4. Métodos de dosagem

Os métodos de obtenção do concreto auto-adensável não são fundamentados apenas na questão da alta fluidez do concreto, mas também considerando a capacidade do concreto passar entre obstáculos sem ocorrer bloqueio nem resistência à segregação.

A dosagem do concreto deve estar relacionada com a proporção entre os materiais constituintes do concreto, a fim de se obter de maneira econômica, resistência e durabilidade (NEVILLE, 1997). Algumas exigências devem ser

atendidas ao se determinar uma dosagem para o concreto, tais como: especificações de projeto, condições de exposição das estruturas, materiais disponíveis na região, técnicas de execução e o custo (HELENE e TERZIAN, 1993).

Os métodos de dosagem utilizados para o concreto auto-adensável diferem muito daqueles utilizados para concretos convencionais, no que diz respeito à seleção e caracterização dos materiais, pois, o CAA apresenta uma grande quantidade de finos e presença de adições minerais e químicas, assim como pelos benefícios alcançados nas suas propriedades frescas. Atualmente, já existem métodos conhecidos, desenvolvidos por alguns pesquisadores da literatura, tais como: Método de Gomes, Método de Okamura e Método EFNARC. Nesse sentido, será feito um resumo de cada método de dosagem citado.

· **Método de Okamura**

Este foi o primeiro método de dosagem racional desenvolvido para a obtenção do CAA. Este método foi desenvolvido pelo Prof. Hajime Okamura, da Universidade de Tóquio, no Japão. O Método de Okamura parte de valores pré-fixados de alguns materiais para alcançar as propriedades de auto-adensabilidade desejadas (GOMES, 2002).

O método é constituído das seguintes etapas:

1) Determinação do volume de ar incorporado no concreto (V_{ar})

O método de Okamura considera um intervalo limite entre 4 % e 7 % para o volume de ar incorporado no concreto.

A EFNARC (2002) recomenda 2 %, devendo ser ajustado de acordo com a necessidade de resistência à ação do gelo-degelo.

2) Determinação do volume de agregado graúdo (V_g)

O volume máximo de agregado graúdo deve ser fixado como 50 % do volume total de agregados, no estado compactado.

3) Determinação do volume de agregado miúdo (V_a)

O volume de agregado miúdo é fixado em 40 % do volume de argamassa.

4) Determinação da razão água/finos (a/f), água/cimento (a/c) e do teor de superplastificante.

A razão a/f e o teor de aditivo superplastificante empregados na dosagem do CAA são determinados a partir de ensaios em argamassa. Estes valores devem ser ajustados para atender às suas características de auto-adensabilidade exigidas. A

relação água/cimento (a/c), em volume, deve ficar entre 0,9 e 1,0, dependendo das propriedades do cimento utilizado. Para isto, o método apresenta como sugestão à realização de ensaios para a determinação das propriedades reológicas da argamassa, através dos ensaios de espalhamento, a partir do tronco de cone de consistência e o ensaio de fluidez, conhecido como Funil V (V-Funnel).

O ensaio de espalhamento da argamassa é realizado em um molde de forma tronco cônica, cujas especificações são apresentadas na Figura 11, a fim de verificar a habilidade de espalhamento da argamassa, medindo-se o diâmetro de abertura da mistura, a partir do qual se determina a área de espalhamento relativa (G_m), como mostra a Equação 01.

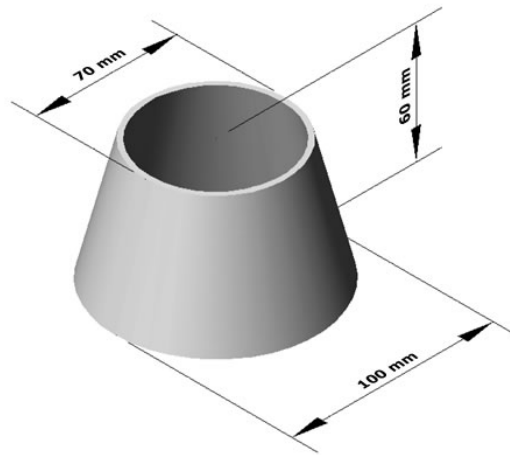


Figura 11 – Ilustração do tronco de cone de consistência.

$$G_m = \left(\frac{d}{d_o} \right)^2 - 1,0 \quad (01)$$

Onde d é o diâmetro medido após o espalhamento da argamassa e d_o é o diâmetro inicial, que corresponde à base do molde, cujo diâmetro é de 100 mm.

No ensaio de fluidez, determina-se o tempo (t) necessário para o escoamento da argamassa (tempo de fluxo), e o tempo de escoamento relativo (R_m), a partir da Equação 02.

$$R_m = \frac{10,0}{t} \quad (02)$$

Domone e Jin (2002) apresentaram sugestões para $G_m \geq 8$, correspondentes a diâmetros de espalhamento ≥ 300 mm; e R_m de 1 a 5, correspondentes a tempos de fluxo (t) de 2 s a 10 s. Já os valores de G_m entre 3 e 7, correspondentes a diâmetros de espalhamento da argamassa de 200 mm a 283 mm e valores de R_m entre 1 e 2, correspondentes aos tempos de fluxo de 5 s. a 10 s, foram adotados para o CAA por Edamatsu et al. (1999) apud Gomes (2002). Segundo Takada et al. (1998, apud NUNES, 2001), uma argamassa adequada para se chegar a um CAA deve ter $G_m = 5,0$ e $R_m = 1,0$.

Inicialmente em argamassas, devem ser ensaiadas para a determinação do espalhamento e da fluidez, variando-se o teor de aditivo superplastificante para que se obtenha o ponto em que $\frac{G_m}{R_m}$ é igual a 5,0. Com o teor de aditivo definidos, são realizados novos ensaios em argamassas, para determinação da relação água/finos que deve variar até que se obtenha o valor ideal que atenda a relação apresentada na Equação 03.

$$\frac{R_m}{G_m^{0,4}} = 0,525 \quad (03)$$

A dosagem de superplastificante deve ainda ser corrigida a partir dos ensaios realizados no concreto, tendo em vista apresentar uma reação diferente comparada à argamassa. Para isto, devem ser realizados os ensaios do espalhamento e Funil V. Após o ajuste da dosagem de superplastificante no concreto, alguns ensaios são realizados para a determinação da capacidade de preenchimento por meio da Caixa U. A Figura 12 ilustra o esquema do fluxograma para o método de dosagem de Okamura (NUNES, 2001).

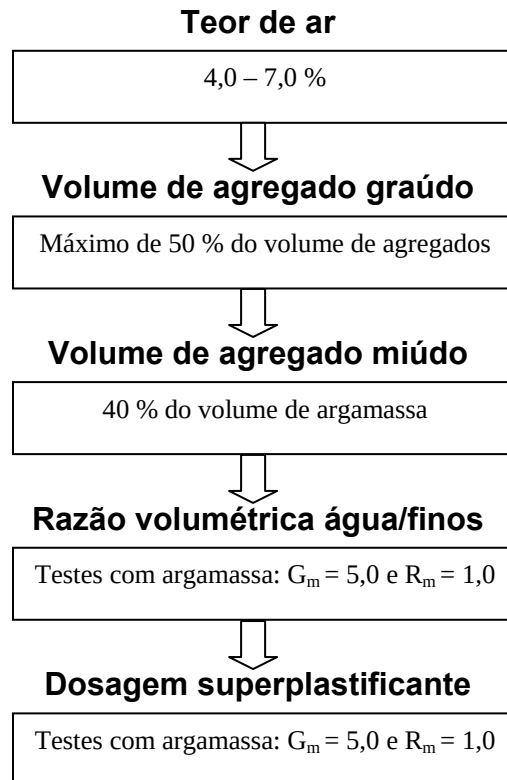


Figura 12 – Esquema do fluxograma do método de dosagem de Okamura (NUNES, 2001).

O método de Okamura apresenta geralmente grande volume de pasta no concreto, pois os parâmetros não são fixados de forma racionalizada (NUNES, 2001). Tal fato decorre de que o comportamento da mistura depende da caracterização e seleção dos materiais, variando assim na dosagem e proporção dos materiais constituintes, tornando, em alguns casos, uma dosagem pouco racionalizada.

• Método EFNARC

Atualmente, com o avanço das pesquisas sobre o uso do CAA, mais especificamente no Japão e países da Europa, diversos programas relacionados ao CAA foram implantados. Estas especificações técnicas, ensaios de caracterização dos materiais e propriedades do CAA nos estados fresco e endurecido, refletem a larga experiência da EFNARC sobre concretos especiais. A EFNARC atualmente é uma grande referência de pesquisa, baseada em várias experiências desenvolvidas por seus sócios na Europa, embora ainda reconheça que os avanços tecnológicos sobre o CAA ainda se encontram em evolução, e modificações podem vir a acontecer com o desenvolvimento das pesquisas encontradas na literatura. A

EFNARC impõe algumas exigências quanto à produção, composição e aplicação do CAA, tais como:

- a) Os materiais constituintes do CAA devem satisfazer às exigências da EN 206-1 (Especificação, desempenho, produção e conformidade do concreto).
- b) Os cimentos utilizados devem satisfazer às exigências da EN 197-1 (Composição, especificações e critérios de conformidade do cimento). A seleção do tipo de cimento dependerá de suas exigências quanto à resistência, durabilidade, dentre outros. O consumo de cimento é da ordem de 350 kg/m^3 a 450 kg/m^3 , pois acima deste valor, pode causar retração excessiva e abaixo só poderá ser utilizado com a adição de um outro material cimentício, tal como: cinza volante ou pozzolana.
- c) Os agregados devem satisfazer às exigências da EN 12620. A dimensão máxima para o agregado graúdo é de 20 mm. Geralmente, são utilizados agregados graúdos com dimensão máxima entre 16 mm e 20 mm. Para o agregado miúdo, todas as areias podem ser utilizadas, contanto que isenta de agentes nocivos e impurezas. É importante salientar a necessidade de se fazer um controle de umidade dos agregados para a obtenção de um CAA com composição uniforme.
- d) A água deve satisfazer às exigências da EN 1008 (Água para concreto).
- e) Os aditivos químicos como os superplastificantes, devem atender às exigências da EN 934-2.
- f) Os aditivos minerais ou adições minerais, como fileres de agregados e pigmentos, devem atender às exigências da EN 12620 (Agregados para concreto); EN 450 (Definições, exigências e controle de qualidade de cinzas volantes para concreto); EN 13263 (Definições, exigências e controle de qualidade da sílica ativa para concreto).
- g) A produção e dosagem do CAA devem atender às exigências da EN 206 (Densidade, aumento de resistência, resistência final e durabilidade).
- h) A quantidade de finos deve ser menor que $125 \mu\text{m}$ para que as propriedades do CAA no estado fresco sejam satisfatórias. Caso contrário deve ser utilizado um agente regulador de viscosidade no concreto.

As propriedades analisadas do CAA no estado fresco são: capacidade de preenchimento, capacidade de passagem entre os obstáculos e resistência à segregação. Para classificar um concreto como auto-adensável, todas estas exigências devem ser analisadas e atendidas. Essas propriedades são caracterizadas usando técnicas já conhecidas, a partir de equipamentos de ensaios

específicos para o CAA. Dentre os vários tipos de ensaios existentes, os mais utilizados são: Para caracterizar a capacidade de fluxo são recomendados os Ensaios de espalhamento “Slump Flow Test” e Funil V (V-Funnel), e para a capacidade de passagem por obstáculos são recomendados o Caixa L (L-Box), Tubo em U e o Teste de auto-adensabilidade. Já para caracterização da resistência à segregação são adotados os ensaios do Funil V e o GTM. Na Tabela 01 são apresentadas às faixas de valores típicos para o CAA adotados pela EFNARC.

Tabela 01 – Faixas para caracterização das propriedades de fluxo do CAA EFNARC (2002).

Propriedades	Ensaio	Unidade	Faixas típicas dos parâmetros	
			Mínimo	Máximo
Capacidade de preenchimento de formas	Espalhamento cone de Abrams	mm	650	800
	T _{50cm} cone de Abrams	seg.	2	5
	Funil V (V-Funnel)	seg.	6	12
	Orimet	seg.	0	5
Capacidade de passagem por obstáculos	Caixa L (L-Box)	(H ₂ /H ₁)	0,8	1,0
	Tubo em U	(H ₂ /H ₁) mm	0	30
	Caixa de preenchimento	%	90	100
	Orimet c/ anel de armaduras	mm	0	10
Resistência à segregação	GTM	%	0	15
	Funil V em T _{5 minutos}	seg.	0	+3

• Método de Gomes

O método apresenta um procedimento de caráter experimental para obtenção da dosagem do concreto auto-adensável de alta resistência. Esse procedimento constitui uma extensão do desenvolvido por Toralles et. al. (1998), para concretos de alta resistência, no sentido de incorporar critérios de dosagem, relativo aos concretos auto-adensáveis.

Os critérios de otimização adotados na aplicação dos procedimentos vêm acompanhados por uma resistência mínima à compressão e por um cumprimento de diferentes requisitos de auto-adensamento no estado fresco, tudo isso com uma quantidade mínima de superplastificante e cimento. Apresentam-se, também, detalhes de procedimentos de ensaios utilizados para a caracterização do estado fresco do CAA.

É importante salientar que existem outros padrões de equipamentos (especificações e/ou tipos diferenciados) utilizados por outros pesquisadores na literatura técnica.

· *Princípios do método*

O procedimento proposto por Gomes (2002), para CAA de alta resistência, foi fundamentado na otimização do esqueleto granular de agregados, otimização separada da composição da pasta, com a determinação da dosagem ótima de superplastificante, variando a quantidade de superplastificante e mantendo constantes as relações água/cimento (a/c) e filler/cimento (f/c), bem como a produção do concreto com a dosagem de superplastificante igual à dosagem ótima da pasta.

A relação a/f deverá ser fixada, a princípio, no limite superior de 0,4, para em seguida ser diminuída, até se atingir a resistência requerida para o concreto. Quanto ao esqueleto granular, deverá ser adotado um tamanho característico máximo para o agregado = 20 mm. A relação areia/brita (ar/br) é determinada segundo um critério de máxima densidade em seco e sem compactação, no sentido de ser obtida uma mínima quantidade de vazios entre os dois materiais.

· **Definição da composição da pasta**

· Pasta

A composição da pasta é definida pela quantidade de cimento e das relações a/c , sp/c , e f/c . Como já foi exposto anteriormente, para um concreto de alta resistência, é fixado, a princípio, a relação $a/f = 0,4$ (limite superior). Em função disso, os parâmetros a serem determinados são as relações sp/c e f/c .

A dosagem de superplastificante nas pastas é determinada através de ensaios do cone de Marsh, com abertura de saída de 8 mm de diâmetro, conforme a Figura 13 (a), e de acordo com as recomendações da EN 445 (Norma Européia – Grautes para bainhas de protendidos. Métodos de Ensaio, 1996). Tal procedimento consiste em introduzir 1 litro de pasta no cone e medir o tempo (T) decorrido, para 500 ml de pasta fluir completamente pela abertura inferior do cone.

Este tempo de fluxo se apresenta como um parâmetro inverso da fluidez da pasta. Variando a relação sp/c , se obtém uma curva $\log T$ versus sp/c , Figura 13 (b). A quantidade de cimento, água e filler foram fixadas anteriormente. A variável é a quantidade sólida de superplastificante. O gráfico $\log T$ versus sp/c é utilizado para a definição do ponto de saturação do superplastificante, que constitui a percentagem ótima de aditivo para a pasta utilizada. O ponto de saturação significa a relação sp/c para a qual um incremento da dosagem de superplastificante não provoca nenhuma melhora significativa na fluidez da pasta, sendo determinada como sendo a relação

de sp/c, correspondente a um ângulo interno de $140^\circ \pm 10^\circ$ na curva log T versus sp/c.. Mas, a dosagem de superplastificante correspondente ao ponto de saturação depende da relação f/c da pasta, das quais devem ser realizados ensaios para distintos valores da relação citada, de forma que podem ser adotados valores de 0,1 a 0,5 para f/c.

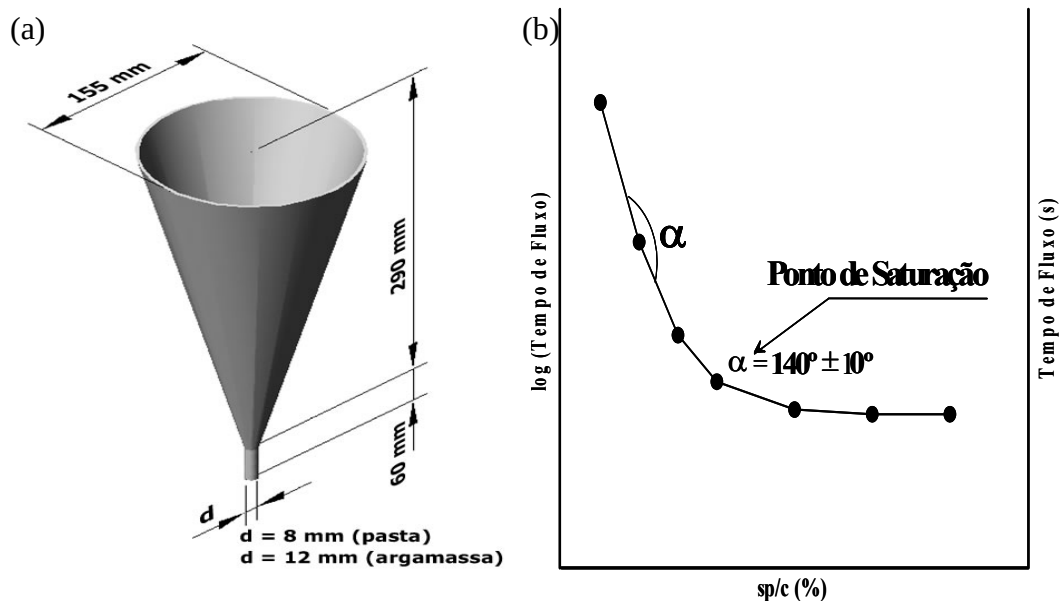


Figura 13 – (a) - Ensaio do cone de Marsh (b) - Curva log T x sp/c (%).

A verificação da habilidade de espalhamento da pasta e determinação do percentual de RSMG é realizada pelo ensaio do mini-slump, como mostra a Figura 14, medindo-se o tempo que a pasta leva para atingir um diâmetro de 11,5 cm, denominado T_{115} , e o diâmetro de espraçamento final da mesma pela média aritmética de duas medidas perpendiculares. Tal equipamento foi proposto por Kantro (1980), que consiste de um molde em forma de tronco de cone. O ensaio é realizado com diferentes relações f/c, cada uma com sua dosagem de superplastificante, correspondente ao ponto de saturação.

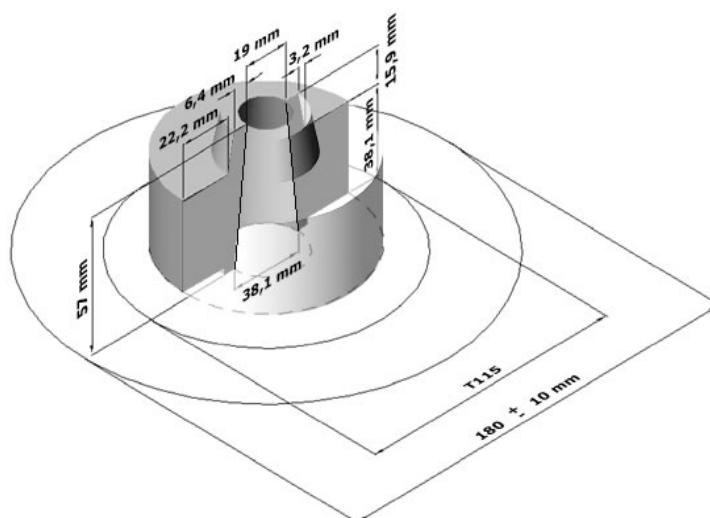


Figura 14 – Ilustração do mini-slump.

A relação f/c ótima da pasta é aquela que apresenta um diâmetro de extensão final no mini-slump de 18 ± 1 cm, e um tempo T_{115} no intervalo de 2 a 3,5 s. Os ensaios da pasta com o cone de Marsh e o mini-slump permitem obter as respectivas relações de sp/c e f/c , que geram misturas de concreto com fluidez máxima, sem segregação e com alto nível de coesão interna, coesão essa, que não prejudique significativamente a fluidez do material.

• Determinação do esqueleto granular

Como já citado anteriormente, as propriedades exigidas para o concreto auto-adensável limitam o tamanho do agregado graúdo e o volume de agregados que deve ser utilizado (BILLBERG, 1999).

A relação ar/br é determinada segundo um critério de máxima densidade em seco e sem compactação, no sentido de ser obtida uma mínima quantidade de vazios entre os dois materiais. Esse ensaio segue as orientações da norma ASTM C29/C29M, porém, é feita uma adaptação pelo fato da não compactação dos materiais. O ensaio consiste em preencher um recipiente com 5 litros de uma mistura seca com certa relação areia/brita. A partir dos dados dos dois materiais, densidade e peso de cada componente, obtém-se a massa unitária e o volume de vazios de cada mistura. O ensaio é realizado para várias relações entre os componentes, até se chegar à relação entre eles que apresenta maior densidade e

menor volume de vazios (HELENE & TERZIAN, 1993; GOMES, 2002). A Figura 15 apresenta o fluxograma do método de dosagem de Gomes.

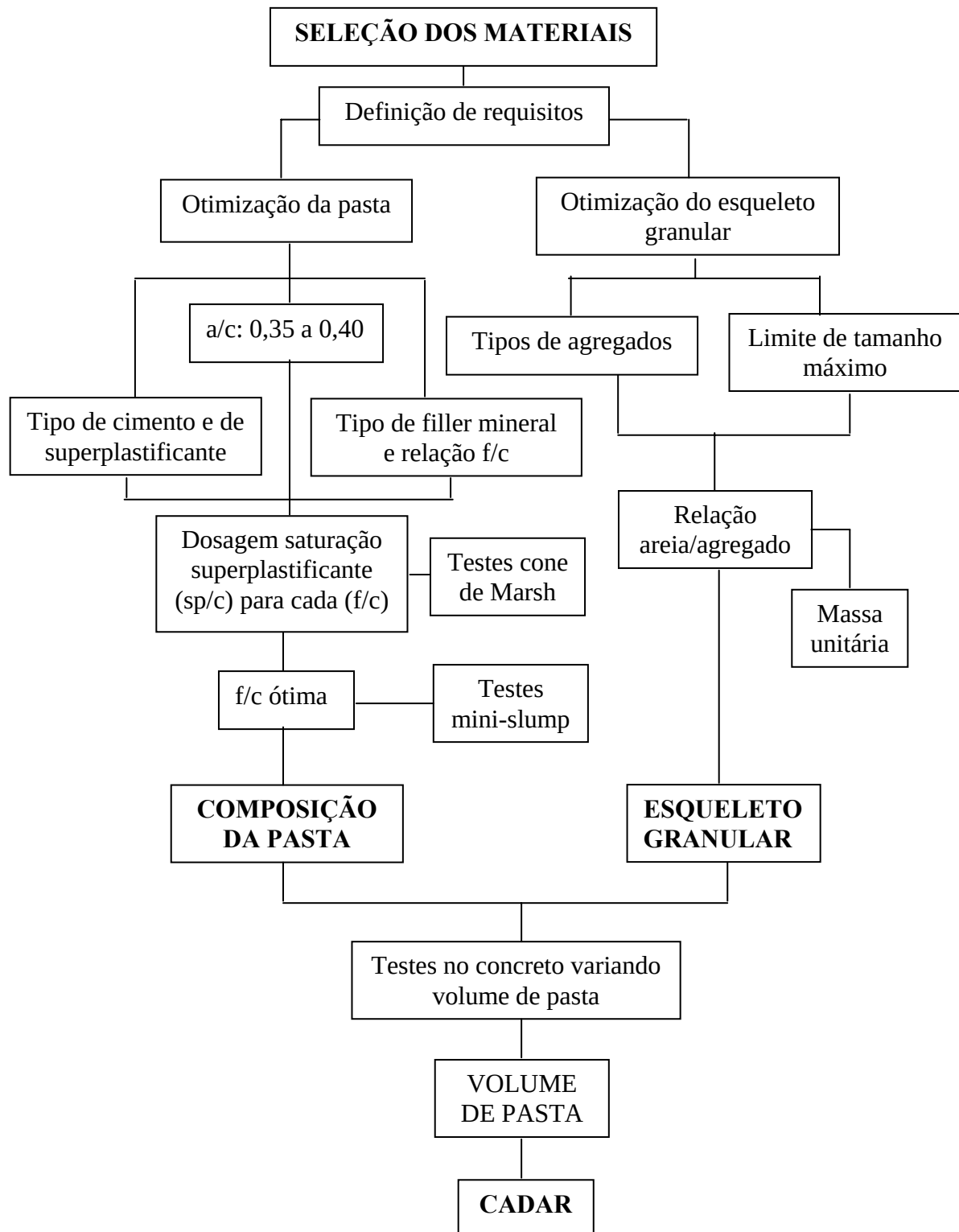


Figura 15 – Esquema do fluxograma do método de dosagem de Gomes (GOMES, 2002).

2.5. Cuidados na produção e aplicação do CAA

A produção e aplicação do CAA requerem cuidados e adaptações durante a caracterização e seleção dos materiais, bem como durante todo o processo de produção do mesmo. Por se tratar de um concreto especial de nova geração, seu uso requer uma adaptação por parte da central fornecedora de concreto ou canteiro de obras, assim como um treinamento especializado dos funcionários envolvidos no processo. Os principais cuidados a serem tomados na produção e aplicação do CAA são:

- a) Controle rigoroso na seleção e caracterização dos materiais empregados, principalmente no que diz respeito à umidade e granulometria dos agregados. Tviksta (2000) cita que a umidade deve ser determinada com uma precisão de 0,5 % para permitir a adequada correção no volume de água.
- b) Apresentar um procedimento de mistura do CAA, tais como: tempo necessário de mistura e equipamentos utilizados. Segundo Jaramillo et al. (2003), o tempo de mistura do CAA é maior em comparação ao concreto convencional, para permitir o efeito provocado pela presença dos aditivos. Emborg (2000) afirma que o tempo de mistura do CAA deve ser de 1,5 a 3 vezes maior do que para concretos convencionais.
- c) Utilizar formas duráveis e resistentes, capazes de suportar as pressões hidrostáticas atuantes, decorrentes da alta fluidez e taxa de preenchimento (SKARENDAHL, 2003).
- d) Somente iniciar a concretagem com o CAA após a realização dos ensaios capazes de avaliar e garantir sua auto-adensabilidade EMBORG (2000).
- e) Para grandes concretagens, Tviksta (2000) indica a possibilidade de se fazer um planejamento prévio para o lançamento do CAA, fazendo assim com que a distância de espalhamento seja limitada em até 6 a 8 m. É importante salientar a importância da concretagem ocorrer de forma contínua, a fim de evitar o aumento excessivo da coesão da mistura e a perda de fluidez.
- f) Em se tratando de elementos pré-fabricados de concreto armado, Juvas (2004) afirma que alguns cuidados especiais devem ser tomados, tais como: controle de qualidade dos materiais; evitar agitação do concreto durante o transporte, para evitar exsudação e segregação, bem como atrasos na aplicação, para que o concreto não perca as suas propriedades iniciais de fluidez. As formas devem estar limpas e lisas, com o desmoldante aplicado antes da concretagem, assim como é feito para

concretos convencionais. O CAA não deve ser aplicado com excessiva rapidez, a fim de se evitar o aprisionamento de ar. Finalmente, a cura deve ser realizada adequadamente.

Como citado anteriormente, o CAA é um material bastante sensível às alterações dos materiais e processos de produção. Isto faz com que sejam necessários atentar para os cuidados especiais na sua produção, de forma a se obter as propriedades desejadas.

2.6. Propriedades do CAA no estado fresco

Como já citado anteriormente, as principais propriedades do CAA no estado fresco são: a capacidade de preencher o interior das formas, a capacidade de passagem entre os obstáculos, sem sofrer nenhum tipo de bloqueio provocado pelo agregado graúdo, bem como a sua resistência à segregação e/ou exsudação. Tais características diferenciam o CAA de um concreto fluido, que se caracterizam apenas pela sua grande fluidez. A habilidade do CAA em preencher formas ou fluir entre os obstáculos é comandada pela alta fluidez e alta coesão da mistura. Já a capacidade de fluir bem entre os obstáculos é comandada pela moderada viscosidade da pasta e da argamassa e pelas propriedades dos agregados, principalmente, o diâmetro máximo dos agregados. A fim de manter a estabilidade ou resistência à segregação da mistura de CAA, alguns cuidados devem ser tomados no sentido de se manter a consolidação e a uniformidade da mistura. Portanto, os principais mecanismos que comandam essas propriedades são a viscosidade e a coesão da mistura.

Diferentes métodos de ensaios foram desenvolvidos ao longo dos anos, com o objetivo de caracterizar as propriedades do CAA no estado fresco. Estas propriedades têm sido caracterizadas usando técnicas recentemente desenvolvidas e estão ainda em fase de evolução. Alguns dos métodos de ensaios mais utilizados para a caracterização de tais propriedades são: ensaio de espalhamento do cone de Abrams (Slump Flow Test), Funil V (V-Funnel), Caixa L (L-Box), Tubo em U e o Ensaio de auto-adensabilidade para o concreto. Para o estabelecimento de parâmetros de capacidade de preenchimento são utilizados os ensaios de espalhamento no cone de Abrams e Funil V, para os parâmetros de capacidade de passagem entre as armaduras é utilizada a Caixa L, e finalmente para a verificação

quanto à presença de segregação é utilizado o ensaio do Tubo em U. Estes métodos serão apresentados nos próximos tópicos deste capítulo (EFNARC, 2002).

▪ Ensaio de espalhamento (“Slump Flow Test”)

O ensaio de espalhamento consiste em preencher o cone de Abrams de concreto sem compactar, e em seguida levantá-lo, lentamente, deixando o concreto se estender em uma base plana, como mostra Figura 16. A média de duas medidas perpendiculares do concreto espreado resulta no valor do parâmetro de extensão final do fluxo. O tempo medido em segundos, para o concreto alcançar um diâmetro de 50 cm também é determinado e chamado de T_{50} .

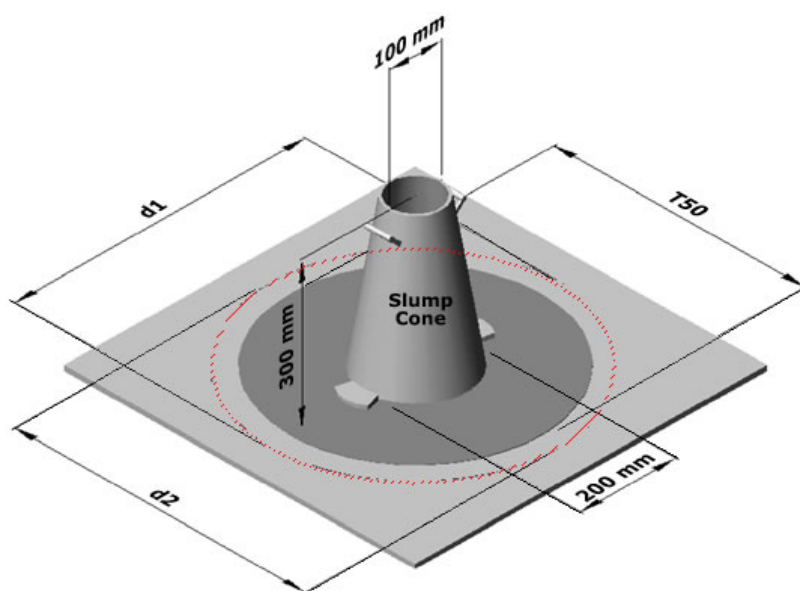


Figura 16 – Ensaio de espalhamento do cone de Abrams (Slump Flow Test).

▪ Funil V (V-Funnel)

O ensaio do Funil V consiste em medir o tempo que a amostra de aproximadamente 10 litros de concreto necessita para fluir totalmente através do orifício inferior do funil, onde tal seção deve ter uma dimensão mínima de 3 vezes o tamanho máximo do agregado. Para o CAA sua dimensão deve variar de 6,5 cm a 7,5 cm. O esquema do equipamento utilizado no ensaio é mostrado na Figura 17.

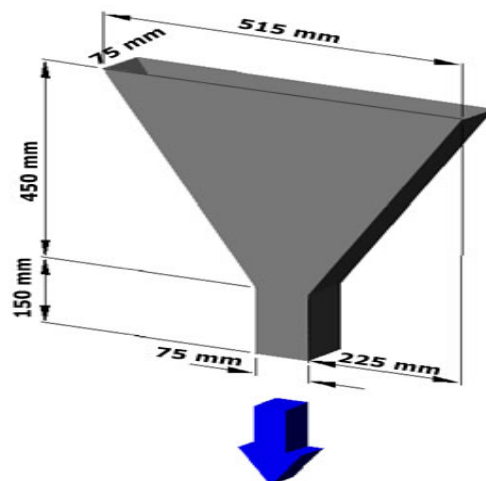


Figura 17 – Ilustração do Funil V (V-Funnel).

▪ Caixa L (L-Box)

O ensaio da Caixa L (L-Box) é realizado preenchendo-se o cômodo vertical da caixa com a amostra de concreto de aproximadamente 12 litros e após a abertura da porta da caixa são medidos os parâmetros TL_{20} , TL_{40} e H_2/H_1 , que são respectivamente, o tempo para o concreto em fluxo alcançar um comprimento horizontal de 20 cm, 40 cm e a relação final entre as alturas do concreto no final do trecho horizontal e a altura do concreto remanescente do trecho vertical da caixa, conforme Figura 18.

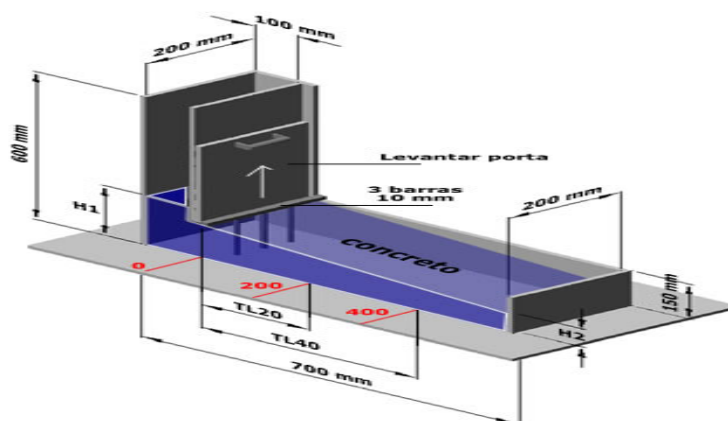


Figura 18 – Ensaio da Caixa L (L-Box).

▪ Resistência à segregação

Freqüentemente, diferentes métodos de ensaios têm sido desenvolvidos para quantificar a resistência do CAA à segregação. Os métodos são usualmente baseados na determinação do agregado gráudo no concreto dentro de uma coluna cilíndrica. O ensaio proposto por Emborg et al. (1999) e Hamada et al. (2000),

ilustrados na Figura 19 (a), consiste em despejar o concreto dentro de uma coluna. Quando o concreto está endurecido, uma amostra é cortada e o agregado graúdo é separado e pesado, avaliando a percentagem do agregado graúdo presente em cada uma das partes cortadas.

A Figura 19 (b) descreve o ensaio proposto por Sedran e De Larrard (1999) , que consiste em colocar concreto fresco num cilindro, e quando endurecido, submetido ao teste de compressão diametral (Brazilian test). A altura (h) com presença de agregado graúdo com dimensões maiores que 8 mm, com relação à extremidade superior da coluna cilíndrica, é verificada na face de ruptura.

Outro método semelhante conhecido como o GTM (BARTOS, 2000; PETERSON, 2000), consiste em despejar 10 litros de concreto em uma coluna e depois de 15 minutos verificar o volume de argamassa na parte superior da amostra, ilustrada pela Figura 19 (b). Argamassas em grandes quantidades apresentam grande segregação.

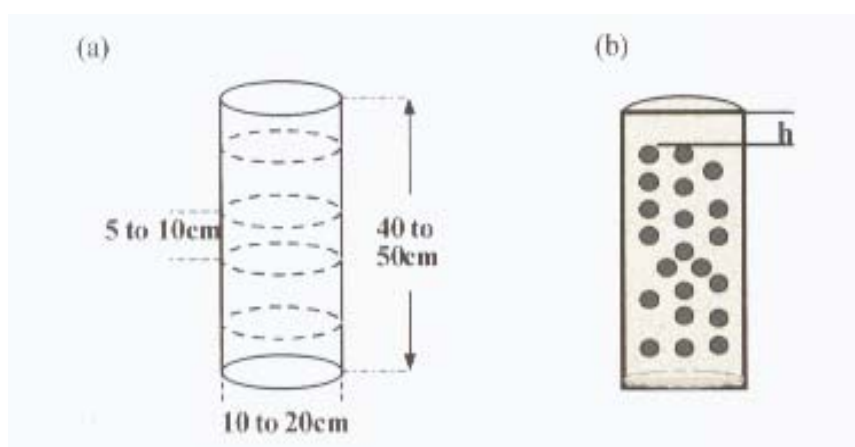


Figura 19 - Ensaio para quantificar segregação no CAA (a) - EMBORG et al. e HAMADA et al., 2000
(b) - SEDRAN e DE LARRARD, 1999.

▪ Tubo U

O método foi proposto por Gomes (2002), que consiste em fazer fluir uma amostra de concreto sem sofrer compactação, através do tubo e após algum tempo, quando o concreto já se encontrar em estado de semi-endurecimento, são cortadas três fatias de 10 cm de espessura, a primeira no início do tubo de entrada (1), a segunda no início do trecho horizontal (2) e a terceira no final do trecho horizontal do tubo (3), conforme a Figura 20. Após a retirada da argamassa através de processo de lavagem das fatias sobre peneira de 5 mm, são pesados os agregados de cada

conjunto de três fatias. As relações de segregação (R.S.) são obtidas dividindo-se a massa dos agregados existentes, pesados após a lavagem e enxugamento com papel toalha; da segunda fatia pela primeira fatia e da terceira fatia pela primeira fatia. O menor valor das duas relações é a relação de segregação (R.S.), que deve ser maior ou igual a 0,90 para CAA.

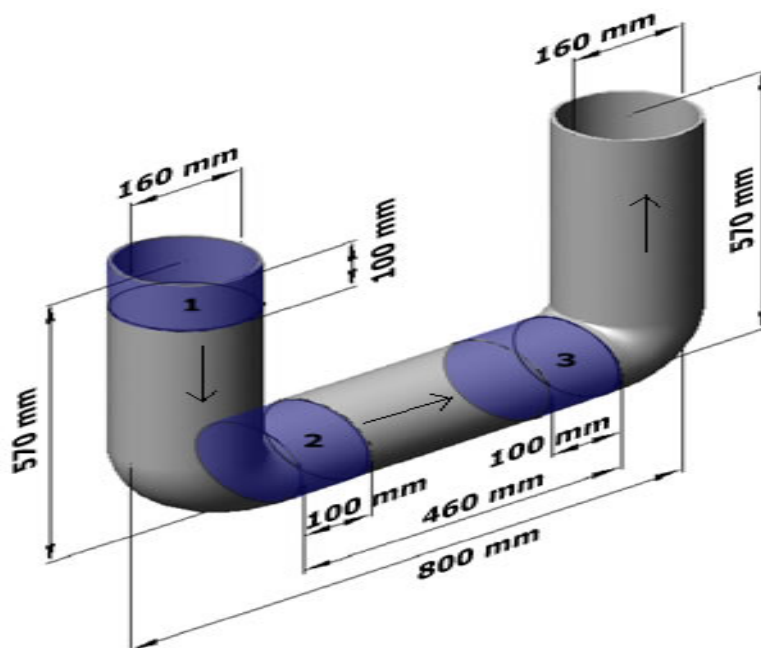


Figura 20 – Ensaio do Tubo U.

▪ Teste de auto-adensabilidade

O equipamento utilizado neste ensaio foi proposto por Ouchi et al. e é utilizado para avaliação do concreto no canteiro de obras (OKAMURA e OUCHI, 2003). O método consiste em avaliar se o material é capaz de fluir através do equipamento. Se for observado bloqueio na região das armaduras, causando impedimento ao fluxo, o concreto é considerado inadequado em termos de auto-adensabilidade, devendo-se fazer um ajuste na dosagem. A Figura 21 apresenta o detalhe do equipamento utilizado para ensaio.

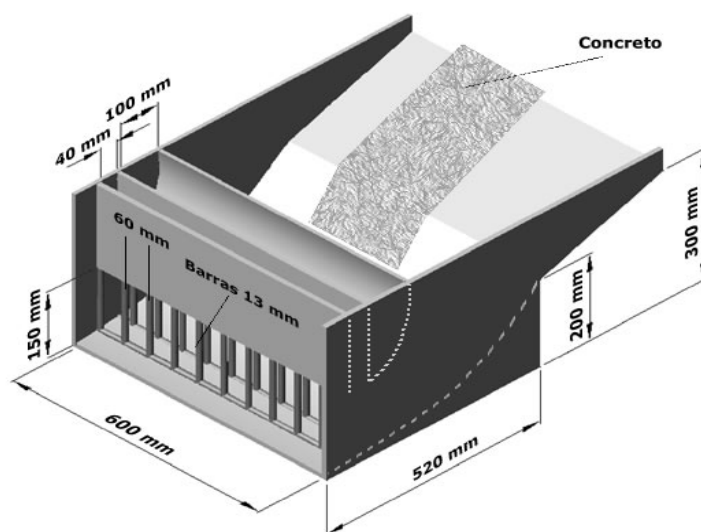


Figura 21 – Equipamento para teste de auto-adensabilidade no canteiro de obras.

2.7. Propriedades do CAA no estado endurecido

Como já citado anteriormente, os benefícios do CAA devem ser atribuídos principalmente às suas propriedades no estado fresco, mas também as propriedades do concreto no estado endurecido devem ser analisadas de forma criteriosa. Somente desta forma o CAA pode ser utilizado de forma segura nos elementos estruturais.

Independente do fato de que o CAA contenha os mesmos componentes dos concretos convencionais, além de aditivos minerais e químicos, existem diferenças notáveis no comportamento desses concretos, principalmente nas propriedades do estado fresco. Porém, é necessário verificar os efeitos que estas modificações provocam nas propriedades do concreto no estado endurecido.

Um aspecto que justifica a importância do estudo das propriedades do CAA no estado endurecido está associado à composição da mistura do CAA, que é bastante diferenciada dos concretos convencionais (KLUG et al., 2003).

As principais razões para as possíveis diferenças entre as propriedades do CAA no estado endurecido e concretos convencionais são (KLUG et al., 2003):

- a) Modificações na composição da mistura - A maior quantidade de finos e a menor granulometria dos agregados causam alterações na composição do esqueleto granular. Isto pode influenciar nos valores de f_c , f_t e E_c .
- b) Modificações na microestrutura do concreto - Uma maior quantidade de finos no concreto (cimento e fíleres) acarreta numa menor quantidade de vazios, e conseqüentemente uma maior densidade com menor porosidade. O concreto se

torna mais estável, acarretando numa maior fluidez e menor porosidade na zona de transição dos agregados – pasta de cimento.

c) Modificações no procedimento de moldagem – Para a verificação das propriedades do CAA no estado endurecido, são moldados c.p., geralmente cilíndricos, a fim de verificar se tais propriedades estão de acordo com as especificadas no projeto estrutural. Este processo de moldagem inclui: a forma de colocação e adensamento, além da cura do concreto. Dentre esses, a forma de colocação e adensamento são os que diferenciam dos concretos convencionais. Para concretos convencionais, a moldagem de c.p. cilíndricos se baseia na norma NBR 5738/03. Essa especifica para cada tamanho de c.p. um nº de camadas necessário para o preenchimento do molde, que depende do tipo de adensamento (adensamento manual ou mecânico), por exemplo: para c.p. de 10 cm x 20 cm é considerada 01 camada, se o concreto for moldado através do vibrador mecânico e 02 camadas se o adensamento for manual. Já para o CAA, ainda não existe uma normalização no que diz respeito ao procedimento de moldagem em c.p., considerando assim o preenchimento do molde de uma só vez; independente do tamanho, por levar em consideração que tal concreto não necessita de adensamento manual ou mecânico. É importante considerar que um concreto mal adensado proporciona o aparecimento de bicheiras e uma quantidade excessiva de vazios, falseando o resultado alcançado pelo rompimento dos c.p. Nenhum estudo foi feito para verificar se tal forma de colocação do CAA nos moldes está ou não influenciando no resultado final de rompimento do c.p., ou seja, na determinação de suas propriedades mecânicas.

d) A transferência de cargas é transferida para a matriz de cimento ou para a zona de transição agregados-pasta de cimento, que se apresenta geralmente em maiores proporções quando comparados aos concretos convencionais. Isto acarreta num aumento da resistência à tração do concreto (f_t), quando comparada aos concretos convencionais.

Atualmente já existe uma larga experiência adquirida ao longo dos anos com relação às propriedades mecânicas do concreto convencional. Em contrapartida, estudos de propriedades mecânicas do CAA ainda se apresentam com resultados bastante restritos, bem como uma verificação do procedimento de moldagem de c.p., que foi praticamente modificado. (KLUG et al., 2003).

Algumas propriedades importantes do concreto convencional no estado endurecido são bastante analisadas, tais como: resistência à compressão e à tração e o módulo de deformação longitudinal, que são propriedades mais facilmente determinadas e utilizadas como referência de qualidade do concreto. Tais propriedades serão abordadas com mais detalhes nos próximos tópicos.

. Resistência à compressão

A resistência é a medida de tensão exigida para romper o material. No projeto de estruturas de concreto armado, considera-se o concreto como o material mais adequado para resistir aos esforços de compressão, e é por isso que a resistência à compressão do material é sempre especificada. Sendo a resistência do concreto função do processo de hidratação do cimento, o qual é relativamente lento, tradicionalmente as especificações e ensaios de resistência do concreto são baseados em c.p. curados em condições específicas de temperatura e umidade, na idade de 28 dias (MEHTA e MONTEIRO, 1994).

De acordo com os principais códigos nacionais e internacionais de concreto, a resistência à compressão é a propriedade mecânica mais analisada no controle tecnológico do concreto, devido à sua facilidade de obtenção, a partir de ensaios simples de curta duração. Alguns parâmetros influenciam na resistência à compressão do concreto, como por exemplo: a composição da mistura, as relações a/c ou a/f; os aditivos utilizados; o tipo de cimento; dentre outros (KLUG et al., 2003).

A idade tradicionalmente considerada é aos 28 dias, porém, ensaios para as idades de 03 e 07 dias, muitas vezes se fazem necessários devido às exigências construtivas, como por exemplo: em projetos de estruturas pré-moldadas e/ou protendidas, onde freqüentemente existe a necessidade da determinação da resistência à compressão do concreto em idades inferiores a 28 dias. Em estruturas, onde o carregamento total só atua quando o concreto tem idade superior a 28 dias, visando tirar vantagem do ganho de resistência após esta idade, pode-se adotar o critério de aceitação da resistência na idade de 90 dias (GOMES, 1995). Portanto, o conhecimento da evolução das propriedades do concreto é de fundamental importância para se prever seus valores nas idades solicitadas. Para os concretos convencionais, algumas equações empíricas são propostas na literatura técnica e normas em vigência, para a determinação da evolução da resistência à compressão (f_c), quando não é possível realizar ensaios em várias idades.

O tamanho e a forma dos c.p. normalizados para ensaio de resistência à compressão do concreto variam de país para país. Na Noruega, a resistência à compressão é medida em cubos de 10 cm e cilindros de 10 cm x 30 cm ou 10 cm x 20 cm. Na França usam-se c.p. cilíndricos de 16 cm x 32 cm. No Canadá, os c.p. são cilíndricos de 10 cm x 20 cm e 15 cm x 30 cm. Nos E.U.A., são adotados cilindros de 15 cm x 30 cm, sendo também comum o uso dos de 10 cm x 20 cm. Na Alemanha, os cubos de 15 cm e de 20 cm são usados. No Brasil, os mais usuais são os c.p. cilíndricos de 15 cm x 30 cm, embora os c.p. de 10 cm x 20 cm comecem a ser utilizados. (BAALBAKI, 1993 e SLATE et al., 1986, apud GOMES, 1995).

Uma questão importante é a relação de f_c , em c.p. cilíndricos de 15 cm x 30 cm e de 10 cm x 20 cm, já que a geometria do molde influencia nas resistências encontradas. (LESSARD et al, 1992, apud GOMES, 1995).

Segundo Lessard et al. (1992) apud Gomes (2002), a relação entre a resistência à compressão dos c.p. 15 cm x 30 cm e de 10 cm x 20 cm, para concretos convencionais, é de 97 %. Já Malhotra (1976) encontra relações variando de 84 % até 132 %, em concretos com resistência de 8,0 até 46 MPa. Um dos fatores importantes que justifica tal variação está associado à área de contato que recebe o carregamento. A Equação 04 ilustra tais relações. Tal relação não é encontrada na literatura técnica, para CAA.

$$\frac{f_{c,cyl}(15cm/30cm)}{f_{c,cyl}(10cm/20cm)} = 0.84...1.32 \quad (04)$$

De acordo com Klug et al. (2003):

- a) Não existe ainda uma comparação exata entre as propriedades mecânicas do concreto convencional com o CAA.
- b) O CAA apresenta maiores resistências que o concreto convencional, para um mesmo consumo de cimento e relação água/cimento (a/c).
- c) A evolução das resistências à compressão do concreto convencional comparada ao CAA com as idades é bastante similar.
- d) A geometria do molde de ensaio influencia na resistência à compressão do concreto.

e) Os resultados encontrados para resistência à compressão são significativamente maiores no concreto auto-adensável (40 % maior), quando comparados ao concreto convencional.

Segundo estudo realizado por Felekoglu (2003), o CAA apresentou maiores valores para a resistência à compressão que o concreto convencional. Nas primeiras idades, o CAA com adição mineral da cinza volante, apresentou baixas resistências à compressão nas primeiras idades, devido à sua grande atividade pozolânica. No entanto, os maiores valores de resistência à compressão aos 28 dias foram obtidos com a adição da cinza volante. Com tal adição mineral, foi possível produzir concreto auto-adensável com um consumo de cimento de 340 Kg/m³. Para as idades de 02, 07 e 28 dias, foram obtidos os seguintes resultados de resistência à compressão para o CAA, de acordo com a Tabela 02.

Tabela 02 - Valores de f_c , aos 02, 07 e 28 dias para CAA (FELEKOGLU, 2003).

Idade (dias)	f_c (MPa)		
	c.p. 01	c.p. 02	Média
02	15,7	15,8	15,75
07	27,2	26,7	26,95
28	32,0	30,9	31,45

Já para Jahromi et al. (2003), o acréscimo de uma grande quantidade de adições, acima de 220 Kg/m³, acarretou numa redução da dosagem de cimento, a fim de se obter um espalhamento adequado, viscosidade moderada, habilidade em fluir e passagem entre os obstáculos aos 28 dias. A mistura de CAA foi obtida com cimento Portland (CP) e cinza volante, com superfície específica de 385 m²/Kg, obtida a partir do Método de Blaine – NBR NM 76 (1998), e massa específica de 2029 Kg/m³. O diâmetro máximo do agregado gráudo utilizado foi de 20 mm. Em seu trabalho, para as idades de 07 dias e 28 dias, foram obtidos os seguintes resultados de resistência à compressão para o CAA, de acordo com a Tabela 03.

Tabela 03 – Valores de f_c , aos 07 dias e 28 dias para CAA (JAHROMI et al. 2003).

c.p.	f_c (MPa)	
	07 dias	28 dias
01	20,8	33,7
02	20,2	33,0
03	19,6	32,4
04	19,0	31,7
05	19,1	31,0
06	18,4	31,6
07	20,5	30,9
Média	19,7	32,1

Ravindrarajah (2003) et al. desenvolveu um trabalho com CAA de alta resistência, com adição mineral da cinza volante. O concreto foi obtido com cimento Portland, diâmetro máximo do agregado graúdo de 20 mm, e cinza volante, nas proporções de 350 Kg/m³ e 134 Kg/m³. Foi verificada que a mistura de CAA apresentou boa resistência à compressão nas primeiras idades, apresentando também uma excelente evolução das suas propriedades mecânicas ao longo das idades mais avançadas, ao contrário do que relata Felekoglu (2003) et al. A Tabela 04 apresenta alguns resultados apresentados por Ravindrarajah (2003) em seu trabalho.

Tabela 04 - Valores de f_c , aos 07, 28 e 49 dias para CAA (RAVINDRARAJAH, 2003).

Idade (dias)	f_c (MPa)			
	c.p. 01	c.p. 02	c.p. 03	Média
07	46,0	46,6	45,0	45,9
28	53,5	59,0	55,6	56,1
49	60,0	68,0	62,0	63,4

A partir dos resultados apresentados por Ravindrarajah (2003), o CAA de alta resistência apresentou uma boa evolução, mostrando que a adição da cinza volante no CAA não influenciou de forma negativa na resistência do CAA para as primeiras idades.

No trabalho de Cheng (2003) foram apresentados alguns resultados de resistências à compressão para o CAA, como segue:

- a) Nas primeiras idades, o CAA com maior quantidade de pasta de cimento e menor relação a/c apresentaram os maiores valores para a resistência à compressão (f_c).
- b) Nas idades mais avançadas, o CAA com menor quantidade de cimento e maior quantidade de material pozolânico apresentou maior resistência à compressão, devido a uma reação mais intensa da pozolana nas idades mais avançadas.

Khayat e Morin (2003) desenvolveram um trabalho sobre as propriedades mecânicas do CAA de alta resistência, utilizando na sua composição o cimento Portland (CP), correspondente a 480 Kg/m³, e a adição mineral da sílica ativa, na proporção de 4 % da composição do cimento. No entanto, foram obtidos os seguintes resultados, como mostra a Tabela 05.

Tabela 05 - Valores médios de f_c aos 03, 07, 28, 52 e 72 dias para CAA (KHAYAT e MORIN, 2003).

Idade (dias)	$f_{c\text{médio}}$ (MPa)
03	35,2
07	48,3
28	58,0
52	68,2
72	72,2

. Resistência à tração

Em projetos estruturais de concreto armado, o aço para absorver aos esforços de tração. A resistência à tração é importante para verificação de fissuração no concreto, quando a estrutura é submetida às condições de serviço. Em estruturas de concreto maciço, tais como barragens, é impraticável o uso de barras de aço. No entanto, uma estimativa confiável da resistência à tração do concreto é necessária, especialmente para se avaliar a segurança da barragem sob abalos sísmicos e retração. (MEHTA e MONTEIRO, 1994).

A resistência à tração para concretos convencionais é em torno de 0,1 a 0,15 (10 a 15 %) da resistência à compressão. Esta grande diferença é atribuída à estrutura heterogênea e complexa do concreto. Quanto maior a resistência à compressão do concreto, maiores são as relações (MEHTA e MONTEIRO, 1994).

Os parâmetros que influenciam nas características da microestrutura da matriz de cimento a da zona de transição dos agregados com a pasta de cimento, são fatores decisivos no valor da resistência à tração do concreto. Para CAA de alta resistência, segundo Gomes (2002), as resistências à tração são em torno de 0,07 a 0,1 (7 a 10 %) da resistência à compressão.

Devido ao fato de que o valor de f_t geralmente é desprezado em projetos estruturais de concreto armado, estudos realizados sobre f_t em CAA se apresentam bastante restritos. No entanto, serão apresentados alguns trabalhos da literatura, que serão utilizados para análises e comparações das propriedades mecânicas e evoluções (Capítulo 5).

Khayat e Morin (2003) apresentaram um trabalho sobre as propriedades do CAA no estado endurecido, chegando à conclusão que, embora ainda exista uma grande complexidade na análise das propriedades do CAA no estado endurecido, a relação entre f_t e f_c para o CAA $\left(\frac{f_t}{f_c} = 0,11\right)$ se enquadra naquela fornecida para concretos convencionais (MEHTA e MONTEIRO, 1994).

Klug et al. (2003) obteve para f_t valores médios de 6,4 MPa, aos 28 dias, que corresponde a 0,11 (11 %) dos valores médios de f_c . Seus resultados mostram que o CAA apresenta maiores resistências médias à tração quando comparados aos concretos convencionais. O trabalho desenvolvido por Klug et al. (2003) constata também um maior crescimento de f_t com relação à f_c ao longo das idades. No entanto, existem poucas publicações sobre CAA que relatam tal fato.

Konig et al. (2001) apresentou em seu trabalho resultados de f_t para CAA de alta resistência, aos 28 dias, em c.p. cúbicos de 15 cm de aresta. O valor médio de f_t foi de 3,7 MPa.

. Módulo de deformação estático (E_c)

O *módulo de deformação estático* (E_c) para um material sob tração ou compressão é dado pela declividade da curva σ (tensão) x ϵ (deformação) do concreto, sob carregamento uniaxial. Tendo em vista que tal curva é não-linear, existem três métodos para o cálculo de E_c , tais como: *Módulo Tangente* (declividade de uma reta tangente à curva em qualquer ponto da mesma); *Módulo Secante* (declividade de uma reta traçada da origem a um ponto da curva correspondendo a 40 % da tensão da carga de ruptura) e *Módulo Corda* (declividade de uma reta traçada entre dois pontos da curva σ x ϵ). O módulo de deformação longitudinal do concreto varia de 14×10^3 MPa a 40×10^3 MPa. O significado do limite de elasticidade em projeto estrutural é devido ao fato dele representar a deformação máxima permitida antes do material adquirir deformação permanente. Portanto, o engenheiro deve conhecer o E_c do material, pois ele influi no cálculo estrutural (MEHTA e MONTEIRO, 1994).

Os valores de E_c utilizados em projetos estruturais de concreto são normalmente estimados a partir de expressões empíricas que propõem dependência direta de E_c com a porosidade, densidade e a resistência do concreto. Em materiais homogêneos existe uma relação direta entre a massa específica (μ) e E_c . Em materiais heterogêneos, multifásicos como o concreto, a fração volumétrica, μ , E_c , e as características da zona de transição determinam o comportamento elástico do material (MEHTA e MONTEIRO, 1994).

Entre as características do agregado gráudo que afetam o módulo de deformação longitudinal do concreto, a porosidade parece ser a mais importante. Isto acontece porque a porosidade do agregado determina a sua rigidez. Agregados

densos têm um módulo de deformação alto. Em geral, quanto maior a quantidade de agregado graúdo com módulo de deformação alto em uma mistura de concreto, maior será o módulo de deformação longitudinal do concreto. Isto condiz para que os concretos constituídos por agregados graúdos de pequena a média densidade e em menor proporção que os concretos convencionais, apresentam valores médios de E_c menores que os concretos convencionais, com a mesma relação a/c (MEHTA e MONTEIRO, 1994).

A seguir, serão apresentados alguns trabalhos da literatura sobre E_c em CAA, que serão utilizados para análises e comparações das propriedades mecânicas e evoluções, apresentadas no Capítulo 5.

No trabalho de Klug et al. (2003) foram encontrados valores médios para E_c de 35,5 GPa, aos 28 dias e 36,5 GPa aos 56 dias. O módulo de deformação longitudinal apresentou-se sensivelmente menor que o concreto convencional, possivelmente devido aos resultados maiores de resistência e menor densidade e quantidade de agregado graúdo. Já König et al. (2001), em seu estudo encontra um valor médio de 27 GPa para um concreto convencional e 29,5 GPa para o CAA, aos 28 dias.

Persson (2000) constata que as propriedades do CAA no estado endurecido: fluência, retração e módulo de deformação longitudinal se apresentam de forma similar ao concreto convencional. Gomes (2002) relata que os resultados apresentados de E_c para concreto convencional são similares aos encontrados para CAA de alta resistência, com resistência à compressão de até 68 MPa,

Dentro desse contexto, a partir dos resultados apresentados na revisão bibliográfica, é verificado que o estudo das propriedades mecânicas do CAA ainda precisa ser aprofundado. São apresentados alguns resultados contraditórios, como por exemplo, os do módulo de deformação longitudinal.

No entanto, diante dos resultados restritos com relação ao módulo de deformação estático em CAA, é percebido uma certa similaridade entre os resultados de E_c , comparando o CAA com o concreto convencional; ou seja, a redução na densidade e quantidade de agregado graúdo, bem como o aumento no volume de pasta, são parâmetros que não influenciam de forma considerável nos valores de E_c .

Materiais e métodos

3.1. Considerações iniciais

Neste capítulo serão apresentados os materiais utilizados neste trabalho, bem como os procedimentos utilizados para a produção do CAA, tais como: os métodos de ensaios utilizados no estudo de pastas e argamassas, a composição do esqueleto granular, os ensaios para determinação e análises das propriedades do CAA no estado fresco, assim como as propriedades no estado endurecido.

O trabalho experimental é desenvolvido no Laboratório de Estruturas e Materiais (LEMA) do Núcleo de Pesquisas Tecnológicas (NPT) do Centro de Tecnologia da UFAL (CTEC).

3.2. Materiais utilizados na composição do CAA

Os materiais utilizados para a produção do CAA são: cimento, areia, brita, resíduo do corte e beneficiamento do mármore e granito (RSMG), aditivo superplastificante e água, cujas características passam a ser apresentadas nos próximos tópicos.

3.2.1. Cimento

O cimento utilizado na pesquisa é o Portland Composto Pozolânico, CP II-Z-32, doado ao NPT - Núcleo de Pesquisas Tecnológicas, de acordo com a NBR 11578/91, cuja resistência é de 32 MPa e densidade de 3150 kg/m³. Este cimento é encontrado com facilidade no mercado local e bastante utilizado na região.

3.2.2. Agregados

O agregado miúdo utilizado é a areia natural média quartzosa, proveniente do Município de Murici/Al., extraída do Rio Mundaú. Suas características físicas são determinadas no LEMA (Laboratório de Estruturas e Materiais). O agregado graúdo utilizado é a pedra britada de origem granítica, com dimensão máxima de 12,5 mm. O uso desta brita é em atendimento às referências em CAA que indicam o uso de menores diâmetros máximos característicos de agregado graúdo, e a pedra britada

de origem granítica pela facilidade de ser encontrada na região. A granulometria dos agregados é determinada segundo a NBR NM 248 (2003).

A Tabela 06 apresenta a caracterização dos agregados utilizados.

Tabela 06 – Caracterização dos agregados utilizados na produção do CAA.

Ensaio	Brita	Areia
Massa específica (g/cm ³)	2,650	2,611
Massa unitária-estado solto (g/cm ³)	1,381	1,449
Massa unitária - estado compactado (g/cm ³)	1,456	-
Absorção (%)	0,82	0,60
Teor de materiais pulverulentos (%)	0,59	1,32
Impurezas orgânicas húmicas (ppm)	-	250
Índice de forma	2,21	-
Índices granulométricos		
Diâmetro característico máximo (mm)	12,5	2,4
Graduação granulométrica	Não se enquadra	Média
Módulo de finura	6,105	2,492

Observa-se na Tabela 06 que as massas específicas dos agregados utilizados apresentam valores próximos dos encontrados normalmente na literatura. Nem a areia nem a brita ultrapassam os limites máximos em percentagem de massa de materiais pulverulentos nos agregados, permitidos pela NBR 7211/83. Os limites máximos para a areia e para a brita são respectivamente 5 % e 1 %.

A areia quando submetida ao ensaio de impurezas orgânicas não apresenta solução mais escura do que a padrão, tendo em vista que se fosse mais escura, a utilização do agregado miúdo no concreto ficaria condicionada ao resultado dos ensaios de qualidade da areia da NBR 7221/87.

O índice de forma dos grãos da brita apresenta bom resultado, visto que este não deve ser superior a 3, quando determinado pela NBR 7809/83, através de duas medições.

O agregado miúdo utilizado se enquadra como areia média, de acordo com NBR 7211/83, com diâmetro característico máximo de 2,4 mm. Já o agregado graúdo não se enquadra nas faixas estabelecidas pelas normas brasileiras, nem como brita 0, nem como brita 1, de acordo com NBR 7211/83. Em função disso, a brita utilizada é chamada de 12,5 mm. Na Tabela 07 são apresentadas as composições granulométricas da brita e da areia, respectivamente.

Tabela 07 – Composições granulométricas da brita e areia utilizada.

Peneiras (mm)	Brita		Areia	
	% retida	% retida acumulada	% retida	% retida acumulada
12,5	0,4	0,4	-	-
9,5	22,0	22,4	-	-
6,3	51,7	74,1	-	-
4,8	17,5	91,6	1,1	1,1
2,4	7,0	98,6	3,4	4,5
1,2	0,5	99,1	10,8	15,3
0,6	0,3	99,4	28,2	43,5
0,3	0,2	99,6	43,5	87
0,15	0,2	99,8	10,8	97,8
Fundo	0,2	100,0	2,2	100,0
Total	100,0	-	100,0	-

Na Figura 22 são apresentados os gráficos das composições granulométricas da brita de 12,5 mm e da areia média, utilizadas na produção do CAA.

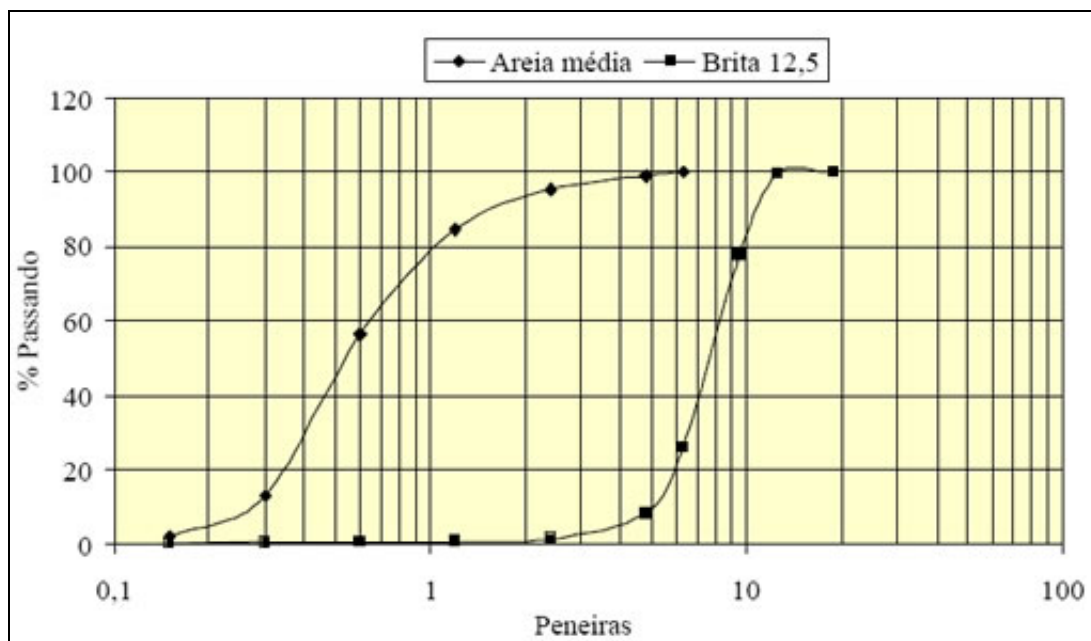


Figura 22 – Curvas granulométricas da brita e areia utilizada.

3.2.3. Resíduo de serragem de mármore e granito (RSMG)

A caracterização do RSMG se baseia NBR 10004/87. Para a caracterização física do resíduo são realizadas as seguintes análises: massa específica real e análise granulométrica, através do Método de granulometria a laser.

A determinação da massa específica real é feita segundo o método do picnômetro de Hélio, de acordo com a NBR 6508/84. Esse ensaio é realizado no Laboratório de Solos do Núcleo de Pesquisas Tecnológicas (NPT), do Centro de Tecnologia da Universidade Federal de Alagoas (CTEC). A análise granulométrica é

realizada no Laboratório de Engenharia Química da UFAL, a partir do Método de granulometria a laser.

O RSMG (filer) utilizado nesta pesquisa é oriundo dos tanques de decantação de uma das indústrias de beneficiamento de mármore e granito do Estado de Alagoas. O resíduo utilizado é proveniente do polimento e corte de chapas de mármore e granito, sendo coletado de uma única vez.

· Coleta e preparação do RSMG

O resíduo coletado na lagoa da indústria beneficiadora é transportado em tonéis de 200 litros para o laboratório, sendo posteriormente despejado sobre lonas e submetido a um processo de pré-secagem ao sol, Figura 23 (a). Quando o material se encontra completamente seco, este é estocado de volta nos tonéis e abrigado, de acordo com a Figura 23 (b).



Figura 23 (a) – Pré-secagem do resíduo ao sol (b) - Estocagem do resíduo.

Seco ao ar, o resíduo é apiloado, como mostra a Figura 24 (a), e em seguida submetido ao processo de peneiramento numa peneira de 0,60 mm, de acordo com a Figura 24 (b). Logo após, o material peneirado é levado à estufa, onde permanece até constância de massa. O resíduo peneirado na peneira de 0,60 mm é levado à estufa para facilitar a passagem do mesmo na peneira seguinte, de menor abertura (0,30 mm), o que seria impraticável se o material estivesse com umidade higroscópica. Em seguida, o material já seco em estufa é peneirado novamente,

agora na peneira de 0,30 mm. Concluído todo esse processamento o resíduo em pó é estocado em baldes fechados, estando pronto para ser aplicado.



Figura 24 (a) – Apiloamento do RSMG (b) - Peneiramento do RSMG.

O RSMG utilizado neste trabalho é o passante na peneira com malha de abertura de 300 μm , denominado RSMG # 300 μm , pois, como já citado no Capítulo 2, as dimensões dos grãos de finos geralmente utilizados em CAA, para garantir os parâmetros de auto-adensabilidade do concreto, possa se enquadrar nesta faixa de intervalo. A escolha de 300 μm se baseia no grau de dificuldade para a produção do RSMG, visto que, a utilização de um resíduo mais fino se tornaria impraticável, devido ao lento processo de peneiramento do material e da necessidade de grandes quantidades de RSMG nas dosagens dos concretos, para a realização dos ensaios e moldagem de c.p. cilíndricos.

· Caracterização do resíduo

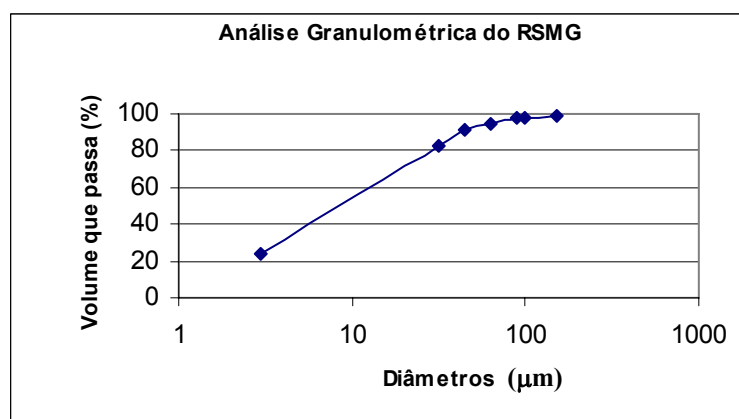
Após todo o processo de coleta e preparação do resíduo, são coletadas amostras do mesmo e submetidas aos ensaios de caracterização. As características do RSMG # 300 μm são apresentadas na Tabela 08 e Figura 25, respectivamente.

A análise granulométrica do RSMG é realizada no Laboratório de Engenharia Química, através do ensaio de granulometria a laser. O ensaio para determinação da massa específica real do resíduo é realizado pelo Método do Picnômetro, de acordo com a NBR 9776/87. Já o ensaio para a determinação da superfície específica do resíduo é realizado pelo Método de Blaine, de acordo com a NBR NM 76: (1998).

Tabela 08 - Características do RSMG # 300 μm .

Propriedade	RSMG # 300 μm
Tipo	Inerte
Massa específica real (Método do Picnômetro)	2685 kg/m ³ .
Superfície específica (Método de Blaine)	208,5 m ² /Kg
Material retido na peneira de 300 μm	0,558%
Granulometria (Método à Laser) % passante (μm)	(%)
3	24,08
32	82,97
45	91,77
63	94,78
88	97,56
100	98,06
150	99,15

De acordo com a Tabela 08, percebe-se que grande parte do resíduo, em torno de 91,77 % do volume total da amostra, apresenta dimensão máxima característica dos grãos inferior a 45 μm . A Figura 25 abaixo apresenta a curva granulométrica do RSMG passante na peneira com malha de abertura de 300 μm , obtida a partir dos valores fornecidos na Tabela 08.

Figura 25 – Curva granulométrica do RSMG # 300 μm .

3.2.4. Superplastificante

Nesta pesquisa, para os estudos das pastas, argamassas e concretos, são utilizados o aditivo superplastificante de última geração policarboxílico. A Tabela 09 abaixo apresenta as propriedades do aditivo utilizado, obtidas através de consulta ao manual do fabricante.

Tabela 09 - Propriedades do aditivo superplastificante utilizado.

Fabricante	MBT
Nome	SP
Propriedade	SPC
Base química	Policarboxilatos
Densidade (g / ml)	1,067 - 1,107
Teor de sólidos (%)	28,5 - 31,5
Aspecto	Líquido Viscoso
Cor	Marrom
Viscosidade (cps)	95 à 160
PH	5 à 7

3.2.5. Água

Para a produção das pastas, argamassas e concretos foi utilizada a água potável proveniente do sistema de abastecimento de água da Universidade Federal de Alagoas (UFAL). A relação água/cimento (a/c) considerada para as pastas, argamassas e concretos foi de 0,5. A relação a/c se enquadra nas faixas de intervalos propostas para concreto convencional.

3.3. Métodos de ensaios

Neste tópico são apresentados os métodos de ensaios utilizados para determinação de características físicas do resíduo (RSMG), como: a superfície específica e a massa específica; estudos em pastas e argamassas; composição do esqueleto granular; propriedades no estado fresco e no estado endurecido do CAA.

É importante salientar que os equipamentos utilizados são àqueles utilizados por Gomes (2002), com as especificações já apresentadas no Capítulo 2.

Os ensaios foram realizados a uma temperatura de $29\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 3\text{ }^{\circ}\text{C}$ e a umidades do ar de $76\% \pm 12\%$.

· Método de Blaine (Determinação da superfície específica do RSMG)

Este método, conhecido como Método de Blaine, de acordo com a Figura 26, tem como finalidade a determinação da superfície específica do RSMG, de acordo com a NBR NM 76 (1998). A finura de um resíduo é determinada por sua superfície específica, observando-se o tempo requerido para uma determinada quantidade de ar fluir através do material compactado, de dimensões e porosidade especificadas.



Figura 26 – Ilustração do ensaio de Blaine.

Sob condições normalizadas, a superfície específica do cimento é proporcional a t , onde t é o tempo para determinada quantidade de ar atravessar a camada compactada de cimento.

O número e a faixa de tamanho dos poros individuais em uma camada especificada são determinados pela distribuição dos tamanhos das partículas de cimento, que também determina o tempo para um dado fluxo de ar.

O método é mais comparativo que absoluto e, portanto, requer uma amostra de superfície específica conhecida para calibração do equipamento. O ensaio para o ensaio de permeabilidade ao ar deve ser mantido à temperatura de $20^{\circ}\text{C} \pm 2^{\circ}\text{C}$ e umidade relativa não superior a 65 %. Todos os materiais para ensaios e calibração devem estar à mesma temperatura do laboratório quando usados e devem ser protegidos da absorção da umidade ambiente durante a estocagem.

A camada compactada de cimento compreende um arranjo de partículas de cimento com um volume de ar especificado incluído entre as partículas. Esse volume de ar é definido como uma fração do volume total da camada e é chamado de porosidade, ϵ . Em outras palavras vale dizer que a fração ocupada pelas partículas de cimento é $(1 - \epsilon)$. Se V é o volume total da camada, o volume absoluto é $V \cdot (1 - \epsilon)$, em cm^3 , e a massa de cimento, m , é $\mu \cdot V \cdot (1 - \epsilon)$, em g, onde μ é a massa específica das partículas de cimento, em g/cm^3 .

Entretanto, conhecendo μ , uma massa de cimento pode ser pesada para produzir a porosidade desejada (η) na camada compactada de volume total V. A superfície específica S, em centímetros quadrados por grama é obtida pela Equação 05, sendo convenientemente expressa como:

$$S = \frac{K}{\mu} \cdot \frac{\sqrt{\epsilon^3}}{(1-\epsilon)} \cdot \frac{\sqrt{t}}{\sqrt{0,1\eta}} \quad (05)$$

Onde: K é a constante do aparelho; ϵ é a porosidade da camada; t é o tempo medido em segundos; μ é a massa específica do cimento, em gramas por centímetro cúbico; η é a viscosidade do ar à temperatura do ensaio, em pascal por segundo.

Com a porosidade $\epsilon = 0,500$ e a temperatura de $20^\circ C \pm 2^\circ C$, a Equação 05 se resume na Equação 06.

$$S = 524,2 \frac{k \cdot \sqrt{t}}{\mu} \quad (06)$$

• Método do Picnômetro

O ensaio de determinação de massa específica de grãos de solos, de acordo com a Figura 27, é baseado na norma de solos, de acordo com a NBR 6508/84. A metodologia deste ensaio pode ser apresentada da seguinte forma:

- a) Coloca-se a amostra em cápsula com água destilada em quantidade suficiente para se obter pasta fluida.
- b) Em seguida se dispersa a pasta em aparelho adequado (para o dispersor referido neste método, o tempo de dispersão será de cerca de 15 minutos).
- c) Transfere-se a amostra para o picnômetro e se junta água destilada até aproximadamente metade de seu volume.
- d) Faz-se vácuo no picnômetro durante 15 minutos, no mínimo, para extrair o ar contido na amostra.
- e) Com o objetivo de verificar se o ar aderente às partículas foi satisfatoriamente removido na operação anterior, adiciona-se água destilada até ser atingida a base do gargalo e faz-se vácuo novamente; se o ar foi realmente removido, o nível d'água

permanecerá constante ainda que apareçam bolhas à sua superfície; havendo, porém, variação no nível d'água, será necessário tomar nova amostra e repetir as operações anteriores. A presença de matéria orgânica em alguns casos pode exigir, para a remoção do ar aderente às partículas, processo mais enérgico que o do vácuo. Deve-se então colocar o picnômetro em banho maria, durante 30 minutos, no mínimo, adicionando-se água destilada para compensar a evaporação.

f) Deixa-se em seguida o picnômetro em repouso, até que a temperatura do conteúdo se equilibre com a do ambiente.

g) Enche-se o picnômetro com água destilada até próximo da marca de calibração e prossegue-se adicionando água destilada até que a base do menisco coincida com a referida marca.

h) Enxuga-se a parte externa do picnômetro e a parte interna do gargalo acima do menisco; pesa-se o picnômetro com a aproximação de 0,1 g e anota-se como P_{as} ;

Determina-se logo a seguir, com aproximação de 0,5 °C, a temperatura do conteúdo do picnômetro. Com esse valor obtém-se, na curva de calibração, o peso do picnômetro cheio d'água, P_a ;

Transfere-se, logo após, o conteúdo do picnômetro para uma cápsula de peso conhecido e seca-se em estufa entre 105 °C - 110 °C, até constância de peso; pesa-se, com aproximação de 0,1 g e obtém-se o peso do solo seco em estufa, P_s (descontando-se o peso da cápsula desta última pesagem).

A massa específica dos grãos de solo calcula-se pela Equação 07:

$$\delta = \frac{P_s}{P_s + P_a - P_{as}} \times \gamma_a \quad (07)$$

, em que:

δ = massa específica dos grãos de solo, em g/cm³;

P_s = peso em g do solo seco em estufa a 105°-110°C;

P_a = peso em g do picnômetro cheio d'água à temperatura do ensaio;

P_{as} = peso em g do picnômetro mais solo, mais água;

γ_a = massa específica da água (g/cm³) à temperatura do ensaio.

Nos ensaios correntes, poder-se-á considerar $\gamma_a = 1$ g/cm³.

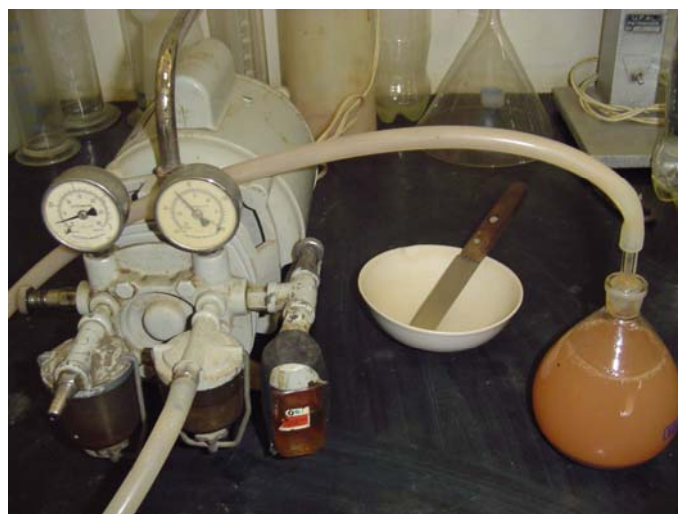


Figura 27 – Ilustração do ensaio do Método do Picnômetro.

· Cone de Marsh

Este ensaio tem sido utilizado previamente para avaliar a fluidez e a dosagem ótima de superplastificante em pastas e argamassas. O procedimento é similar ao ASTM C 939, usado para teste de fluidez de graute.

Os aparatos utilizados no ensaio são: a argamassadeira, o cone de Marsh, um beaker graduado de 1000ml, uma proveta graduada de 500ml, um cronômetro e os recipientes para acomodar os componentes da mistura antes do ensaio.

No interior do cone é colocado um volume de material (V), e em seguida é medido o tempo gasto para um volume (v) fluir através do orifício inferior do mesmo.

Na literatura técnica, o diâmetro (d) do bocal do cone varia de 5 mm a 12,5 mm e o volume (V) inicial utilizado varia de 800 a 2000 ml. Toralles-Carbonari et al. (1996) utiliza um cone com $d = 8$ mm, no teste de desempenho da pasta com volumes $V = 800$ ml e $v = 200$ ml; De Larrard et al. (1997) utiliza um cone de $d = 12,5$ mm, no teste de desempenho da argamassa com volumes $V = 1000$ ml e $v = 500$ ml; e Aïtcin (1998) utiliza um cone de $d = 5$ mm em testes de pastas, com volumes $V = 1200$ ml e $v = 500$ ml (GOMES, 2002).

Já para o ensaio utilizado neste trabalho, o diâmetro de abertura inferior no cone de Marsh é de 8 mm para as pastas e 12 mm para argamassas. O procedimento é àquele utilizado por Gomes (2002), onde um volume de 1000 ml do material (pasta ou argamassa) é colocado dentro do mesmo e o tempo para fluir 500 ml do material, é medido (Figura 28). Esse período que o material passa para fluir é chamado de tempo de fluxo.

É importante salientar que o processo de mistura destas pastas é bastante diferenciado, em comparação com as pastas produzidas para concretos convencionais. O procedimento e tempo de mistura são etapas importantes, como segue:

- a) Mistura de cimento e RSMG antes da adição da água, para que a mistura ocorra de forma uniforme e homogênea.
- b) Mistura do cimento + RSMG com a água durante 60 s.
- c) Retirada do excesso da pasta contida na argamassadeira durante 30 s.
- d) Mistura da pasta por mais 60 segundos.
- e) Retirada do excesso da pasta contida na argamassadeira durante mais 30 s e colocação do superplastificante
- f) Mistura da pasta durante mais 02 minutos, totalizando um tempo de 05 minutos de mistura.



Figura 28 – Ilustração do cone de Marsh.

· Mini-slump e tronco de cone de consistência

Estes métodos de ensaios são àqueles já apresentados anteriormente no Capítulo 2. O mini-slump é baseado no método de Gomes (2002) e o tronco de cone de consistência baseado no método de Okamura (1997).

Nas pastas é utilizado o ensaio do mini-slump, proposto por Kantro (1980) como mostra a Figura 29, e para argamassas é utilizado o ensaio do tronco de cone de consistência. Os ensaios consistem em preencher o equipamento com pasta ou argamassa e depois levantar deixando-o espalhar livremente em uma base. Nesse

ensaio é verificada a capacidade de espalhamento das misturas já ensaiadas no cone de Marsh através da média entre dois diâmetros finais perpendiculares, sem utilizar nenhum método de compactação. Também é verificado o aspecto visual quanto à presença de segregação e/ou exsudação.

Nestes ensaios, a média dos diâmetros de espalhamento dos materiais tende a aumentar com o aumento da dosagem de superplastificante na mistura, para relações f/c e a/c pré-fixadas, de forma que a partir de certa dosagem, o diâmetro deixa de sofrer aumento considerável e a pasta ou argamassa tende a apresentar sinais de segregação. Nessa dosagem citada se encontra o ponto de saturação ou dosagem de saturação do superplastificante. Para as pastas, o espalhamento final no mini-slump apresentado no método de Gomes et al. (2002) é de $180 \text{ mm} \pm 10 \text{ mm}$.

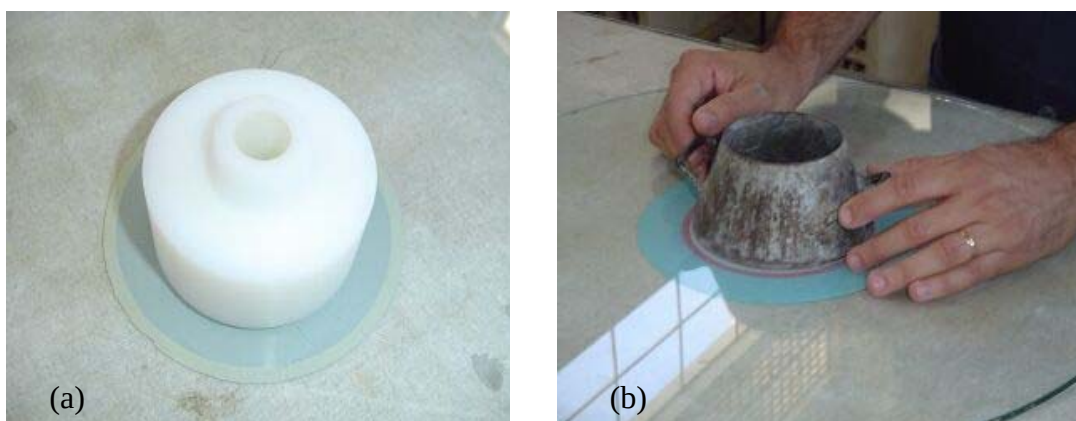


Figura 29 (a) - Mini-slump (b) - Tronco de cone de consistência.

Para as argamassas, algumas recomendações para os espalhamentos finais são apresentadas na literatura técnica, como segue: Edmatsu et al. (1999) sugere para esse ensaio, um diâmetro final de espalhamento de 200 mm a 283 mm. Domone e Jin (1999) sugerem um diâmetro final superior a 300 mm. Nesse ensaio também é observado que logo em seguida do ponto de saturação, obtido no cone de Marsh, a argamassa espalhada, começa a apresentar os primeiros sinais de segregação.

Os aparatos utilizados nestes ensaios são: a argamassadeira, o mini-slump ou o tronco de cone de consistência, uma base de vidro, um beaker, uma trena, um cronômetro e recipientes para acomodar os componentes da mistura antes do ensaio.

· Ensaio de espalhamento (“Slump Flow Test”)

Este método de ensaio é aquele já apresentado anteriormente no Capítulo 2, baseado no método de Gomes (2002).

Esse ensaio é um dos mais utilizados para verificação da propriedade de preenchimento do CAA nas formas, dentre eles; Gomes e Rooney (2002), Araújo (2003), Tutikian et al. (2004).

O ensaio de espalhamento (Slump Flow Test) consiste em preencher o tronco de cone de concreto sem compactar, em seguida levantá-lo, lentamente, deixando o concreto se estender em forma aproximadamente circular, de acordo com a Figura 30. A média de duas medidas perpendiculares do espraio final do concreto resulta no valor do parâmetro de extensão final do fluxo. O tempo para o concreto alcançar um diâmetro de 50 cm, que é chamado de T_{50} , também é medido em segundos.



Figura 30 – Ilustração do Slump Flow Test.

Os principais equipamentos utilizados nesse ensaio são: cone de Abrams, de acordo com a NBR NM 67, chapa de aço de 1 m x 1 m e um cronômetro com precisão de 0,1 s. A chapa de aço de 2 mm de espessura tem um círculo centralizado demarcado de 50 cm, para medição do tempo que o concreto leva para atingir esse diâmetro.

O ensaio de espalhamento apresenta a seguinte seqüência:

- 1- Colocar a chapa numa superfície horizontal e nivelada.
- 2- Umedecer a chapa.
- 3- Encher rapidamente o cone de concreto.

- 4- Registrar o tempo, em segundos, que o concreto alcança o diâmetro de 500 mm (T_{50}).
- 5- Após o concreto atingir o repouso, efetuar duas medidas perpendiculares do diâmetro final, onde o valor final do espalhamento é o resultado da média entre os dois valores (BILBERG, 1999).

• Funil V (V-Funnel)

Este método de ensaio é àquele já apresentado anteriormente no Capítulo 2, como mostra a Figura 31, baseado no método de Gomes (2002).

Esse método consiste em medir o tempo para certo volume de concreto (aproximadamente 10 litros), fluir totalmente por um funil (Ozawa, et al., 1994 apud Gomes, 2002). Um baixo tempo de esvaziamento do funil é favorável com respeito à capacidade de fluxo e um alto tempo significa alta viscosidade, com tendência a sofrer bloqueio e segregação (GOMES, 2002). Neste trabalho, este teste é utilizado para avaliar a propriedade do estado fresco de capacidade de preenchimento nas formas.

O ensaio do Funil V apresenta a seguinte seqüência:

- 1- Molhar o interior do Funil V, limpando com um pano molhado.
- 2- Colocar o funil com seu fundo fechado apontando para o recipiente receptor da amostra.
- 3- Nivelar a superfície de topo do funil.
- 4- Introduzir a amostra de concreto no funil sem exercer sobre o mesmo nenhum tipo de compactação, deixando a superfície de concreto nivelada.
- 5- Após 15 segundos, abrir rapidamente a tampa do orifício inferior do funil e simultaneamente ligar o cronômetro registrando o tempo (em segundos) de esvaziamento total do funil.

Os aparatos utilizados neste ensaio são: Funil V; um recipiente de capacidade de 5 litros para derramar a amostra a ser colocada no funil; um recipiente tipo bandeja de capacidade de 12 litros para receber a amostra derramada de dentro do funil; um cronômetro de precisão de 0,1 segundo para medir o tempo de esvaziamento total do funil.



Figura 31 – Ilustração do Funil V.

· Caixa L (L-Box)

Este método de ensaio é àquele já apresentado anteriormente no Capítulo 2, como mostra a Figura 32, baseado no método de Gomes (2002).

Os aparatos utilizados neste ensaio são: Caixa L, recipiente para o preenchimento da parte vertical da caixa com concreto, dois cronômetros de precisão de 0,1 segundo para medir os tempos TL_{20} e TL_{40} , e uma trena para efetuar as medidas das alturas H_1 e H_2 do concreto na parte horizontal da caixa após o repouso do mesmo.

O ensaio da Caixa L apresenta a seguinte seqüência:

- 1- Colocar a Caixa L sobre uma superfície nivelada.
- 2- Limpar e umedecer as superfícies internas da caixa.
- 3- Preencher com concreto a parte superior da caixa, sem utilizar nenhum tipo de adensamento, deixando a superfície do concreto nivelada, retirando o excedente.
- 4- Após 15 segundos, levantar rapidamente a porta e simultaneamente ligar os dois cronômetros registrando em segundos os tempos para o concreto atingir na horizontal as marcas de 20 cm e 40 cm, TL_{20} e TL_{40} , respectivamente.
- 5- Logo após o concreto atingir seu estado de repouso, medir com uma trena suas alturas H_1 e H_2 , no início e final da parte horizontal da Caixa L, respectivamente.

Tanto o bloqueio como a estabilidade do concreto pode ser detectada visualmente. Se o concreto formar uma camada elevada atrás das armaduras,

significa que o mesmo sofreu bloqueio e segregação. Usualmente é apresentado no bloqueio o agregado graúdo reunido entre as barras das armaduras. Se o agregado graúdo se apresentar bem distribuído ao longo da superfície do concreto até o final da parte horizontal da caixa, significa que o mesmo pode ser considerado estável (PETERSSON, 2000).



Figura 32 – Ilustração da Caixa L (L-Box).

• Tubo U

Este método de ensaio é àquele já apresentado anteriormente no Capítulo 2, como mostra a Figura 33, baseado no método de Gomes (20



Figura 33 – Ilustração do Tubo U

O equipamento do Tubo U consiste de três segmentos de tubo e dois joelhos de PVC, todos com um diâmetro interno de 150 mm, cortados em meia cana e mantidos juntos através de fixação longitudinal com fitas adesivas e com abraçadeiras transversais, de forma que, após o ensaio, as partes sejam separadas sem provocar destruição do concreto nele colocado. A segregação é avaliada como

o grau de não uniformidade na quantidade de agregado graúdo, nas diferentes partes do tubo. São utilizados, nesse teste, aproximadamente 32 litros de concreto.

Os aparatos utilizados neste ensaio são: recipientes para encher o Tubo U de concreto, Tubo U, base de madeira do Tubo U, instrumentos cortantes para retirar as amostras, três bandejas para receber as amostras, peneira de 5 mm, sistema de água com mangueira para lavagem das amostras, papel toalha para enxugar as britas das amostras e uma balança.

O ensaio do Tubo U apresenta a seguinte seqüência:

- 1- Nivelar e aprumar o Tubo U com o auxílio de uma base em forma de caixa de madeira, como mostra a Figura 33.
- 2- Introduzir o concreto em queda livre de uma altura de 80 cm, de forma que o mesmo preencha a forma de Tubo U, completamente, até sua extremidade oposta sem nenhuma compactação.
- 3- Manter o Tubo U na vertical durante um período de aproximadamente três horas, até o concreto endurecer parcialmente, ficando rijo o bastante para se manter com a forma, mas não totalmente endurecido.
- 4- Colocar o Tubo U na horizontal e remover a meia cana superior do mesmo.
- 5- Extrair as três amostras cilíndricas de 10 cm de espessura. A primeira corresponde aos primeiros 10 cm da extremidade de entrada do concreto (m_1), a segunda e a terceira amostras (m_2 e m_3) são extraídas, no sentido de fluxo do concreto, no início e no final do trecho horizontal do tubo, respectivamente.
- 6- Lavar as três amostras (m_1 , m_2 e m_3) , separadamente, sobre uma peneira de 5 mm para remover a argamassa e se obter o agregado graúdo limpo.
- 7- Enxugar as superfícies das britas provenientes das três amostras com papel-toalha e determinar suas massas separadamente.

A massa de m_1 serve como referência. Calculam-se as razões $\frac{m_2}{m_1}$ e $\frac{m_3}{m_1}$. A

Razão de Segregação (R.S.) é tomada como o menor dos dois valores. A segregação é considerada desprezível se $R.S. \geq 0,90$ (GOMES, 2002).

· Teste de auto-adsensabilidade

Este método de ensaio é o mesmo descrito anteriormente no Capítulo 2, proposto por Ouchi et al. (2003). O método consiste em avaliar se o material é capaz de fluir através de um aparato instalado entre o caminhão betoneira e a bomba. Se for observado bloqueio na região das armaduras, causando impedimento ao fluxo, o concreto é considerado inadequado em termos de auto-adsensabilidade, devendo-se fazer um ajuste da dosagem. A Figura 34 apresenta o detalhe do equipamento utilizado.

O equipamento é bastante utilizado como critério de aceitação do concreto auto-adsensável na obra. Segundo os trabalhos apresentados na literatura, algumas especificações podem se apresentar diferenciadas, como o diâmetro e espaçamento entre as barras, dentre outros. Segundo Kubo et al. (2001) e Ouchi et al. (2003), este ensaio tem como função caracterizar a capacidade de passagem do CAA entre os obstáculos (armadura). Para este ensaio, o espaçamento entre armaduras é de 6 cm com diâmetro nominal de 12,5 mm.

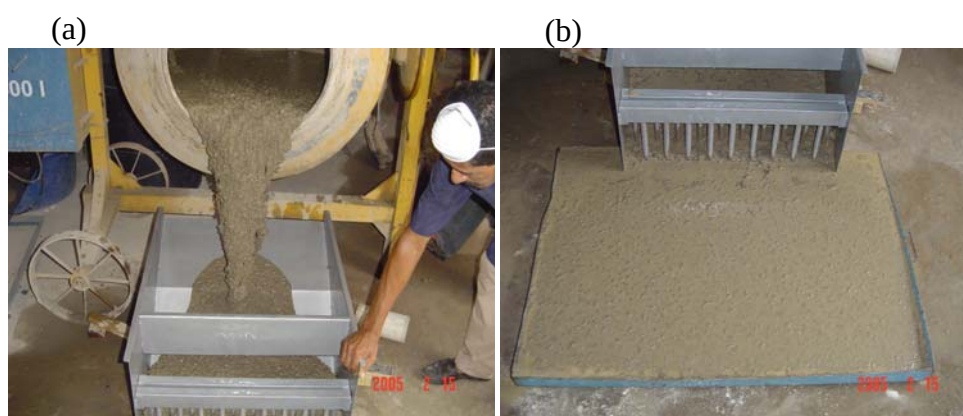


Figura 34 - Ilustração do ensaio de auto-adsensabilidade.

· Ensaio de rompimento em corpos-de-prova cilíndricos

O rompimento de c.p. cilíndricos 10 cm x 20 cm e 15 cm x 30 cm é realizado para a determinação de propriedades mecânicas do concreto, como: resistência à compressão (f_c) e à tração (f_t) e o módulo de deformação longitudinal (E_c), seguindo as orientações estabelecidas nas normas brasileiras: NBR 5739/94, NBR 8522/1984 e NBR 7222/94, respectivamente.

Para a determinação de f_c e f_t , é utilizada uma prensa AMSLER, com capacidade máxima para 200 tf, de acordo com a Figura 35 (a). Para a

determinação de E_c , é utilizada uma máquina universal da marca EMIC DL 30000, com capacidade máxima para 30 tf, de acordo com a Figura 35 (b).



Figura 35 – Ilustração da prensa (a) - AMSLER (b) - EMIC.

Os c.p. cilíndricos, após a moldagem, permanecem 24 horas dentro do molde, sendo posteriormente retirados e imersos em tanques d'água, passando o tempo necessário para a respectiva idade de rompimento. O procedimento de rompimento de c.p. cilíndricos, para a determinação de f_c , pode ser apresentado da seguinte forma:

Ao atingir a idade desejada de rompimento dos c.p., os mesmos são retirados dos tanques d'água. Os c.p. passam por um processo de secagem ao ar livre, durante um período de aproximadamente 02 horas, para posteriormente serem capeados, em ambas as extremidades, com uma pasta de enxofre e cimento na proporção de 1 : 3. Após o capeamento do c.p., o mesmo é centralizado no prato da prensa AMSLER, de acordo com a Figura 36, e carregado com uma velocidade de carga constante até a ruptura.



Figura 36 – Ensaio de resistência à compressão.

A determinação da resistência à tração indireta ou compressão diametral, conhecido internacionalmente como “Brazilian test”, também é realizada na prensa AMSLER. Um aparato pra centralizar o c.p. é utilizado, conforme ilustra a Figura 37. Com relação ao ensaio de resistência à compressão diametral, não há necessidade de capeamento, visto que o c.p. é solicitado diametralmente e não axialmente. Os principais cuidados são com relação à cura adequada do c.p., limpeza do equipamento e centralizar o c.p. no aparato e na prensa.

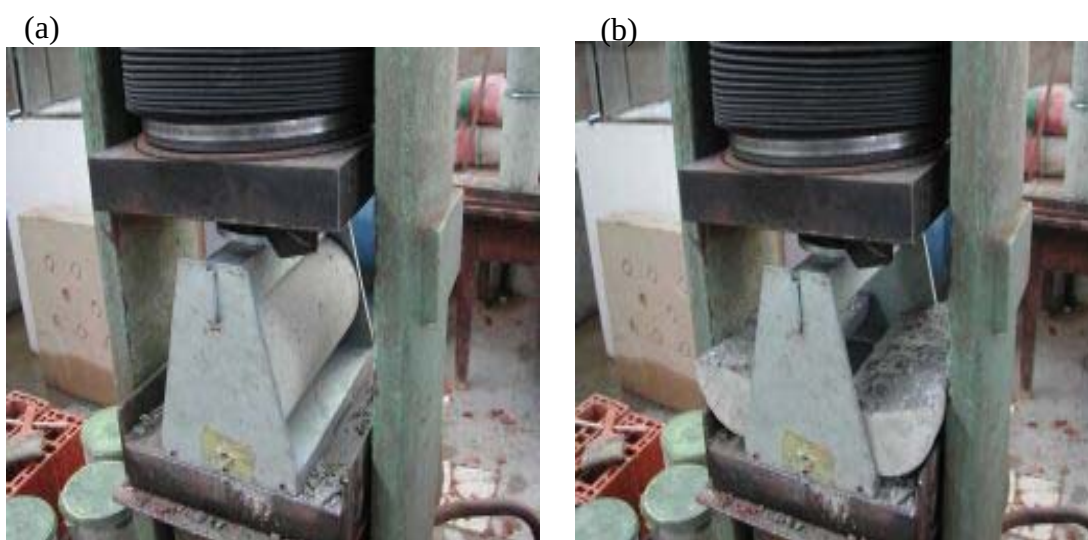


Figura 37 – Ensaio de resistência à compressão diametral.

Os procedimentos de moldagem, desmoldagem, cura e capeamento dos c.p., para a determinação de E_c , são os mesmos prescritos anteriormente para a determinação de f_c .

Após o capeamento dos c.p., o mesmo é centralizado no prato da prensa da EMIC, de acordo com a Figura 38. Esta prensa se encontra configurada para a determinação de E_c a partir do Módulo Tangente (declividade de uma reta tangente à curva em qualquer ponto da mesma). O procedimento de ensaio para a determinação de E_c pode ser apresentado da seguinte forma:

O c.p. depois de capeado em ambas as extremidades, é colocado no eixo do prato, onde será aplicado o carregamento. Acoplado ao c.p., se encontra um extensômetro, como mostra a Figura 38, capaz de determinar as deformações sofridas pelo concreto de acordo com as variações de tensões aplicadas. O c.p. é carregado até atingir 30 % da tensão de ruptura do mesmo e posteriormente descarregado, em três ciclos repetitivos. O valor da tensão de ruptura do concreto à compressão é determinado no ensaio de determinação da resistência à compressão.



Figura 38 – Determinação do módulo de deformação longitudinal.

Produção dos concretos

4.1. Considerações iniciais

Neste capítulo serão apresentados e analisados os resultados obtidos nas várias etapas que antecederam a determinação da composição do CAA estudado. Como partida um CAA de referência, denominado como CAA42, desenvolvido no estudo de Lisboa (2004) é analisado. Em seu trabalho o autor conclui que o CAA42, usando como único filer o RSMG # 600 μm (resíduo passante na peneira com malha de abertura de 600 μm), não apresentou uma boa coesão e que sua velocidade de fluxo ($T_{50} = 0,81\text{s}$), determinada no ensaio de espalhamento, não atendeu aos intervalos propostos na literatura técnica, que propõe um tempo para o concreto atingir um espalhamento de 50 cm (T_{50}) de 2 a 5 s (EFNARC 2002), o qual levou o autor a adicionar no CAA42 um segundo aditivo mineral, sílica ativa na proporção de 3 % da massa de cimento, além do RSMG, com o objetivo único de melhorar a coesão da mistura.

Conforme foi apresentado no Capítulo 2, a dimensão dos grãos e a superfície específica dos aditivos minerais influem na coesão, viscosidade e fluidez das misturas, isto é, quanto maior for sua superfície específica, maior será a coesão e a viscosidade. Além disso, o uso de mais de um filer na composição do concreto pode trazer gastos adicionais e exigir uma maior atenção na hora de produzi-lo.

“Levando em consideração tais observações, foram produzidos três concretos usando apenas uma adição mineral, o resíduo RSMG # 300 μm (resíduo passante na peneira com malha de abertura de 300 μm), a fim de verificar se o uso de um aditivo mineral mais fino proporciona uma melhor coesão e viscosidade na mistura, e ao mesmo tempo eliminar o uso de um segundo aditivo mineral”.

“Dos três concretos produzidos, denominados CAA38, CAA40 e CAA42, àquele que apresentar um melhor comportamento no ensaio de espalhamento (Slump Flow Test), ou seja, uma maior fluidez e capacidade de preenchimento, será selecionado e submetido posteriormente aos demais ensaios para verificar a capacidade de auto-adensabilidade do mesmo”.

Um comparativo das características granulométricas do RSMG # 600 μm , usado no estudo de Lisboa (2004), com o obtido neste trabalho, RSMG # 300 μm , é apresentado na Tabela 10.

Tabela 10 – Características dos RSMG # 300 μm e RSMG # 600 μm (LISBOA, 2004).

Propriedade	RSMG (# 300 μm)	RSMG (# 600 μm)
Tipo	Inerte	Inerte
Massa específica (Kg/m^3)	2812 Kg/m^3	2685 Kg/m^3
Superfície específica (m^2/kg)	208,5 m^2/kg	198,8 m^2/kg
Material retido na peneira (μm)	0,558 %	0,74 %
Granulometria (Método Laser) Peneira (mm)	(% Passante - μm)	(% Passante - μm)
3	24,08	10,29
32	82,97	61,36
45	91,77	70,80
63	94,78	78,79
88	97,56	85,46
100	98,06	87,45
150	99,15	92,94

De acordo com a Tabela 10, é verificado que 91,77 % do RSMG # 300 μm apresentam diâmetros inferiores a 45 μm , enquanto que, o RSMG # 600 μm é de 70,80 %. Isto significa uma redução considerável nas dimensões dos grãos dos finos, o qual reflete em uma maior superfície específica. Com o objetivo de visualizar melhor a distribuição do volume de finos passante em função do diâmetro de abertura em μm , são apresentados na Figura 39 gráficos com as curvas granulométricas de cada resíduo.

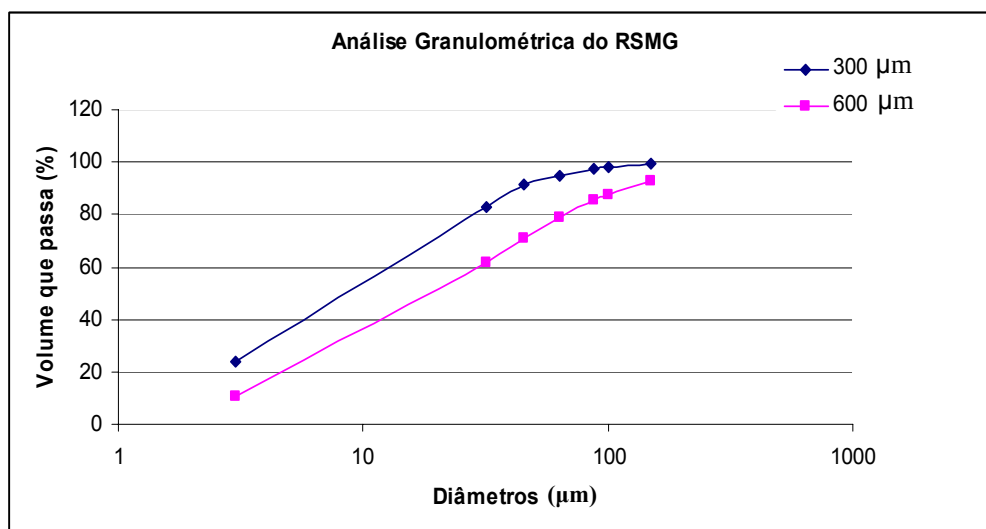


Figura 39 – Curvas granulométricas do RSMG # 300 μm e do RSMG # 600 μm .

Se comparados, pode-se constatar que a curva da Figura 39 (a) se apresenta de forma mais acentuada e crescente, para um dado diâmetro (μm), quando comparada a curva da Figura 39 (b). Isto significa uma diminuição considerável na granulometria do RSMG, devido ao considerável aumento dos volumes que passam nas respectivas peneiras. Portanto, é importante verificar se tal mudança das características físicas do filer proporciona modificações no comportamento fresco e endurecido dos concretos.

A dosagem dos concretos produzidos nesse estudo é definida seguindo os procedimentos adotados no estudo de Lisboa (2004) que se baseia no método proposto por Gomes (2002). A fim de verificar se as propriedades do CAA, no estado endurecido, apresentam um comportamento similar aos concretos convencionais, é produzido também um concreto convencional, denominado C.C.

4.2. Produção do CAA

A produção do CAA seguindo o método de Gomes (2002) e utilizado por Lisboa (2004) é constituída de várias etapas preliminares, tais como: caracterização e seleção dos materiais; estudos em pastas e argamassas, para visualização e análise do comportamento de fluxo de ambos e determinação da dosagem ótima de superplastificante; determinação da relação ótima entre agregados (a_r/b_r), para definição do esqueleto granular, e determinação do volume ótimo de pasta no concreto, que proporcione ao mesmo características de auto-adensabilidade.

Portanto, outros estudos em pastas, argamassas e concretos são realizados, conforme apresentados a seguir.

· Análises em pastas

As pastas com RSMG # 300 μm são analisadas variando a dosagem de superplastificante, através dos ensaios do cone de Marsh, com diâmetro de abertura inferior do bocal de 8 mm, e do mini-slump, a fim de determinar a dosagem ótima do aditivo na pasta, com sua fluidez, respectivamente. Para a produção das pastas são fixadas as relações: $a/c=0,5$; e $f/c=0,5$, de acordo com o procedimento de Lisboa (2004).

As Figuras 40 (a) e (b) mostram os resultados do ensaio do cone de Marsh das pastas com o RSMG # 300 μm e RSMG # 600 μm , respectivamente.

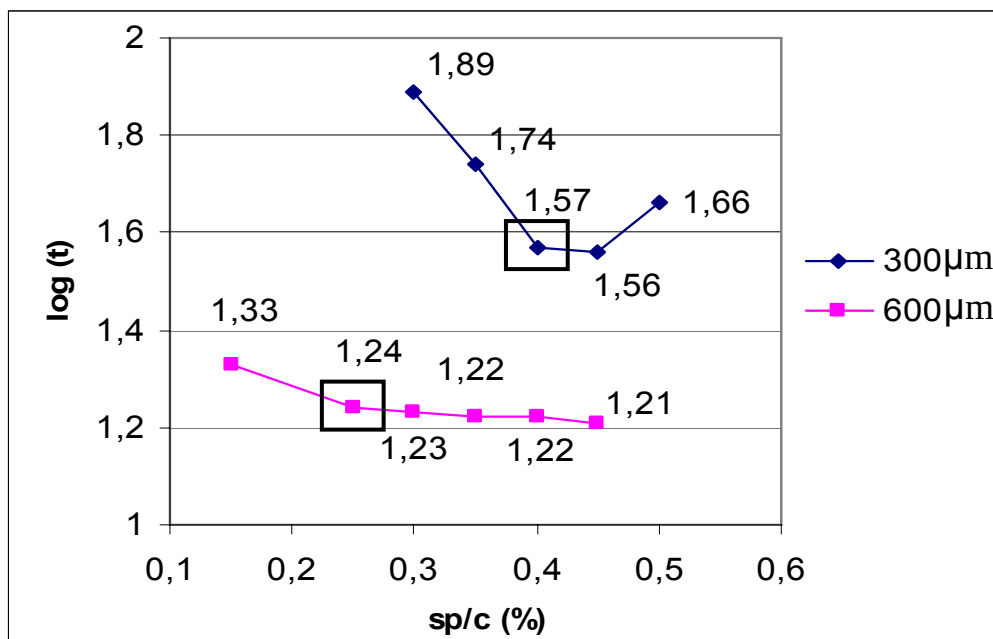


Figura 40 – Cone de Marsh em pastas com RSMG # 300 μm e RSMG # 600 μm LISBOA (2004).

A partir dos resultados apresentados na Figura 40 (a) e (b), pode-se constatar que a dosagem ótima do superplastificante (sp/c) da pasta com RSMG # 300 μm é 0,4, enquanto para a pasta com RSMG # 600 μm é de 0,25, respectivamente. Portanto, pode-se perceber que o aumento na dosagem de superplastificante é influenciado pela variação granulométrica do RSMG, ou seja, um resíduo com menor dimensão de grãos acarreta numa necessidade maior de superplastificante para garantir as características de fluidez e coesão na mistura, com ausência de segregação e/ou exsudação.

Para o ensaio do mini-slump, os gráficos com as pastas produzidas com RSMG # 300 μm e RSMG # 600 μm são mostrados nas Figuras 41 (a) e (b), respectivamente.

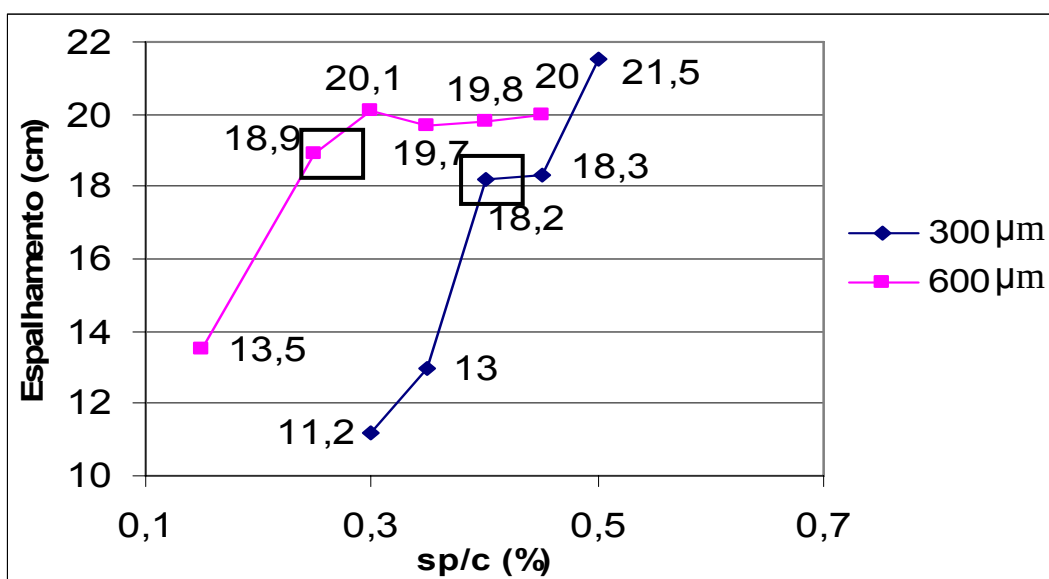


Figura 41 – Mini-slump em pastas com RSMG # 300 µm e RSMG # 600 µm LISBOA (2004).

A partir da Figura 41, percebe-se que o aumento da dosagem de superplastificante nas argamassas, causado pela redução nas dimensões dos grãos de finos, não influencia no espalhamento final das pastas na dosagem ótima de superplastificante: 18,2 cm (RSMG # 300 µm) e 18,9 cm (RSMG # 600 µm).

A fim de visualizar os espalhamentos finais em duas pastas, com RSMG # 300 µm, e relações sp/c de 0,3 e 0,4, respectivamente, as Figuras 42 (a) e (b) apresentam tais resultados, obtidos a partir do ensaio do mini-slump. Para sp/c = 0,3 (11 cm), com dosagem de aditivo superplastificante insuficiente e sp/c = 0,4 (18,2 cm), correspondente à dosagem de saturação da pasta (dosagem ótima).

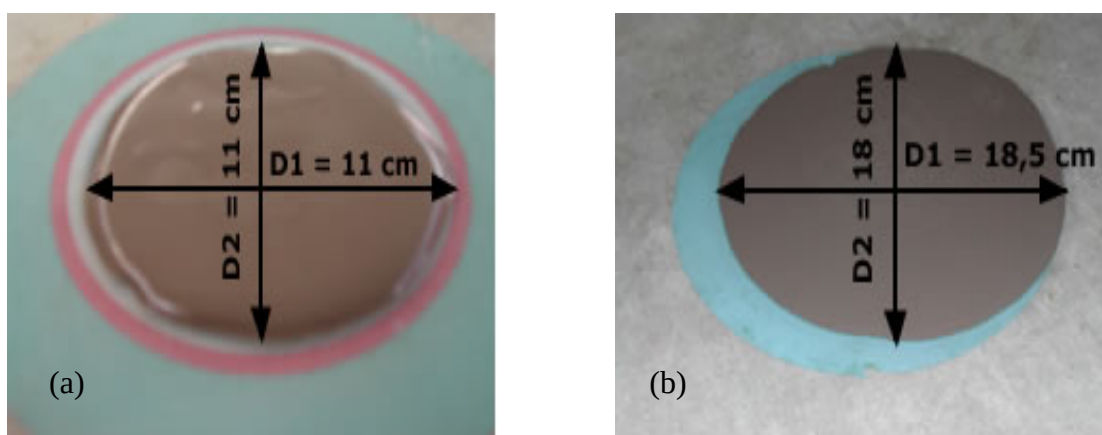


Figura 42 - Espalhamento das pastas com RSMG # 300 µm (a) - sp/c = 0,3. (b) - sp/c = 0,4.

Nas pastas, para o RSMG # 300 μm , a partir dos gráficos do cone de Marsh, Figura 40 (a), e do mini-slump, Figura 41 (a) observa-se que, apesar do incremento de 0,05 % na dosagem de superplastificante, o tempo de fluxo, bem como o espalhamento da pasta não apresenta variação considerável quando comparados aos valores obtidos com a dosagem anterior de aditivo igual a 0,4. Além do mais, para esta dosagem a pasta apresenta espalhamento na faixa de 18 ± 1 cm no mini-slump (GOMES, 2002), como mostra a Figura 42 (b). “Com isso, pode-se afirmar que a dosagem de saturação do superplastificante em relação à massa de cimento (sp/c), para a pasta com RSMG # 300 μm , é de 0,4”.

· Análises em argamassas

Assim como nos ensaios das pastas, o ensaio do cone de Marsh também é utilizado em argamassas, mas com diâmetro de abertura do bocal inferior de 12 mm. Já para verificação do espalhamento final da argamassa, é utilizado o tronco de cone de consistência, ao invés do mini-slump. Para a produção das argamassas são fixadas as relações: a/c=0,5; f/c=0,5; e a quantidade de areia como sendo o dobro da quantidade de cimento, de acordo com o procedimento de Lisboa (2004). A absorção do agregado miúdo também é considerada.

Para o estudo das argamassas, são produzidas misturas, com RSMG # 300 μm , variando a dosagem de superplastificante, a fim de determinar a dosagem ótima do aditivo na argamassa e sua fluidez, respectivamente. As Figuras 43 (a) e (b) mostram os resultados do ensaio do cone de Marsh das argamassas com o RSMG # 300 μm e RSMG # 600 μm , respectivamente.

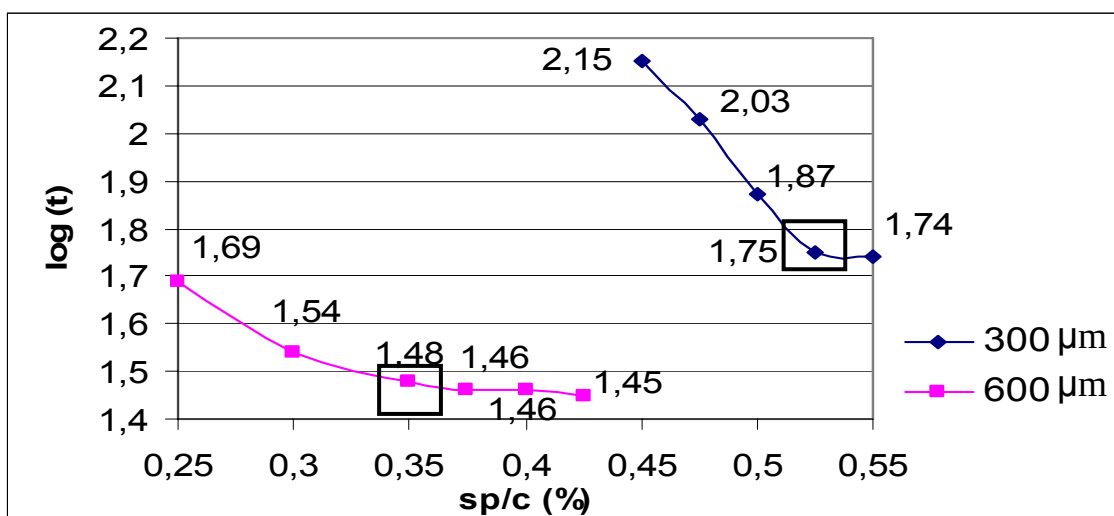


Figura 43 – Cone de Marsh em argamassas com RSMG#300 μm e RSMG# 600 μm LISBOA (2004).

A partir dos resultados apresentados na Figura 43 (a) e (b), pode-se constatar que a dosagem ótima do superplastificante (sp/c) na argamassa com RSMG # 300 μm é 0,525, enquanto para a argamassa com RSMG # 600 μm é de 0,35, respectivamente. Portanto, percebe-se também que o aumento na dosagem de superplastificante é influenciado pela redução granulométrica do RSMG.

O ensaio do tronco de cone de consistência é representado através dos gráficos das argamassas produzidas com RSMG # 300 μm e o RSMG # 600 μm , de acordo com as Figuras 44 (a) e (b), respectivamente.

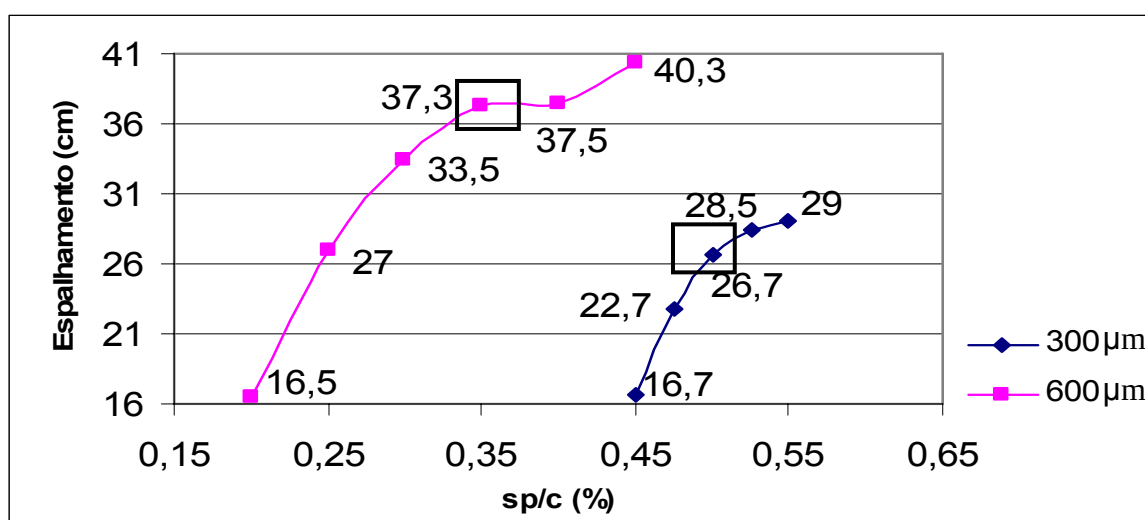


Figura 44–Tronco de cone em argamassas com RSMG # 300 μm e RSMG# 600 μm (LISBOA, 2004).

A partir da Figura 44, percebe-se que, apesar do aumento da dosagem de superplastificante nas argamassas com RSMG # 300 μm , causado pela redução nas dimensões dos grãos de finos, o espalhamento final da argamassa na dosagem ótima de superplastificante, é reduzido (de 37,3 cm para 28,5 cm), possivelmente devido à necessidade do RSMG # 300 μm , que por ser mais fino que o RSMG # 600 μm , necessita de uma maior quantidade de água na mistura. Os dois espalhamentos obtidos atendem aos intervalos propostos na literatura técnica. Domone e Jin (1999) apud Gomes (2002) sugerem um diâmetro final de espalhamento para a argamassa superior a 30 cm. Já Edamatsu et al. (1999), considera que argamassas para concreto auto-adensável deve apresentar espalhamento na faixa de 20 a 28,3 cm de espalhamento no tronco de cone de consistência.

A fim de visualizar os espalhamentos finais em duas argamassas, com RSMG # 300 μm , e relações sp/c de 0,45 e 0,525, respectivamente, as Figuras 45 (a) e (b)

apresentam tais resultados, obtidos a partir do ensaio do tronco de cone de consistência. Para $sp/c = 0,45$ (16,7 cm), com dosagem de aditivo superplastificante insuficiente e $sp/c = 0,525$ (28,5 cm), correspondente à dosagem de saturação da argamassa.

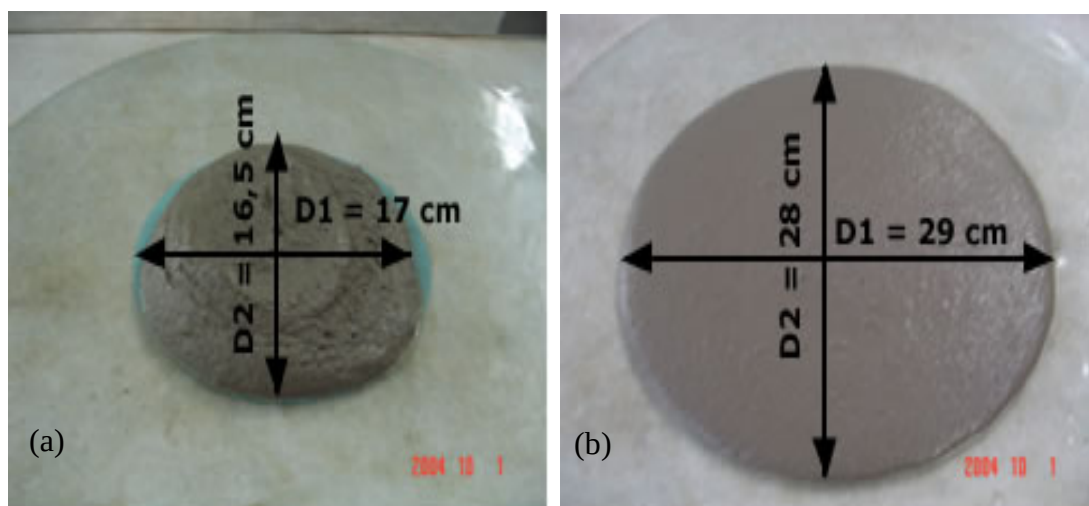


Figura 45 – Espalhamento da argamassa com (a) - $sp/c = 0,45$ (b) - $sp/c = 0,525$.

Nas argamassas, para o RSMG # 300 μm , a partir dos gráficos do cone de Marsh, Figura 43 (a), e do tronco de cone de consistência, Figura 44 (a) observa-se que, apesar do incremento de 0,025 % na dosagem de superplastificante, o tempo de fluxo, bem como o espalhamento da argamassa não apresenta variação considerável quando comparados aos valores obtidos com a dosagem anterior de aditivo igual a 0,525, como mostra a Figura 45 (b). *“Com isso, pode-se afirmar que o ponto de saturação do superplastificante (dosagem ótima) para argamassa é de 0,525”.*

Essa dosagem ótima de superplastificante para a argamassa (0,525 %), com RSMG # 300 μm , representa um aumento de 0,125 % na relação ótima de sp/c , com relação às pastas (0,4 %). De acordo com Lisboa (2004) com RSMG # 600 μm , a dosagem ótima de superplastificante da argamassa (0,35 %) apresenta um valor de 0,10 % maior que para as pastas (0,25 %).

O método proposto por Gomes (2002), para CAA de alta resistência, utiliza a dosagem de superplastificante no CAA como sendo a mesma obtida para a pasta. No entanto, é feito um ajuste neste estudo, com relação à dosagem de superplastificante, sendo utilizada para a produção dos concretos, a mesma

dosagem de superplastificante obtida na argamassa, seguindo o procedimento de Lisboa (2004).

· Determinação do esqueleto granular

O ensaio de determinação do esqueleto granular é baseado na NBR NM 248, sendo modificado por Gomes (2002), e visa a obtenção da maior massa unitária (M.U.) e o menor índice de vazios da relação agregado graúdo/agregado miúdo, nos quais ficam determinados os percentuais de agregados, o menor volume de vazios das diversas combinações, e conseqüentemente, o menor volume de pasta na mistura de concreto. Estes resultados são obtidos a partir das massas unitárias para as diversas combinações de percentuais dos agregados, fazendo cada um variar de 0 % a 100 %, como mostra a Figura 46.

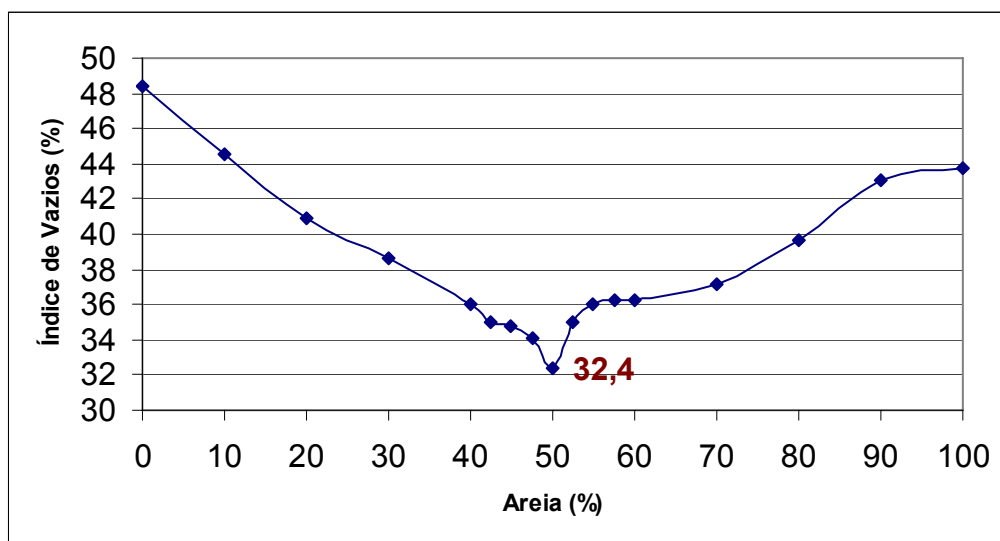


Figura 46 – Curva da composição do esqueleto granular dos agregados.

A relação encontrada com menor índice de vazios entre a areia (2,4 mm) e a brita (12,5 mm), é de 50 % e 50 %, respectivamente, conforme mostrada na Figura 46, com massa unitária (M.U.) = 1777 Kg/m^3 e 32,4 % de índice de vazios. No trabalho, é adotado o sobre o volume total de agregados no concreto, o percentual de 50 % para a areia e 50 % para a brita.

4.3. Determinação do volume de pasta no CAA

Após os estudos realizados em pastas e argamassas, como: determinação da composição da pasta e da argamassa, com as respectivas dosagens de superplastificante, e a proporção entre agregados, a partir da determinação do esqueleto granular, é determinada a composição dos concretos a serem produzidos, para análise de suas propriedades nos estado fresco e endurecido.

A fim de determinar o volume ótimo de pasta necessário para que o concreto atenda aos parâmetros exigidos para o mesmo ser caracterizado como auto-adensável (tais parâmetros e propriedades são àquelas já apresentadas no Capítulo 3), são produzidos três concretos com diferentes volumes de pasta: 38 %, 40 % e 42 % do volume de concreto, de acordo com o procedimento seguido por Lisboa (2004).

As Tabelas 11 e 12 mostram as composições dos concretos com o RSMG # 300 µm, produzidos neste trabalho, assim como os concretos produzidos por Lisboa (2004), com RSMG # 600 µm, respectivamente.

Tabela 11 – Composição dos concretos (kg/m³) variando o volume de pasta

CAA com RSMG # 300 µm			
Volume de pasta (%)	38	40	42
Cimento (kg)	373	392	412
Areia (kg)	809	783	757
Brita (kg)	822	795	768
Filer (RSMG) (kg)	186	196	206
Água (l)	186	196	206
SP (l) (sp/c=0,525)	6,0	6,3	6,6

Tabela 12 – Composição dos concretos (kg/m³) variando o volume de pasta

CAA com RSMG # 600 µm		
Volume de pasta (%)	40	42
Cimento (Kg)	401	421
Areia (Kg)	752	727
Brita (Kg)	827	799
Filer (RSMG) (Kg)	201	211
Água (l)	201	211
SP (l) (sp/c=0,35)	4,7	4,9
Silica ativa (Kg) (sf/c=0,03)	xxx	xxx

A partir dos resultados apresentados nas Tabelas 11 e 12, pode-se constatar que, em geral, a redução nas dimensões dos grãos do RSMG proporciona as

seguintes diferenças: redução no consumo de cimento e aumento na dosagem de superplastificante.

Antes de verificar se o concreto atende aos critérios dos ensaios apresentados no Capítulo 3, tais como: Funil V (V-Funnel), Caixa L (L-Box), Tubo U e Teste de auto-adensabilidade, são analisados os três concretos com RSMG # 300 μm , apenas quanto ao ensaio de espalhamento no cone de Abrams (Slump Flow Test), a fim de verificar qual dos concretos melhor atende aos critérios de espalhamento final e o tempo para o mesmo atingir um espalhamento final de 50 cm (T_{50}), com ausência de segregação e/ou exsudação. Aquele que melhor se enquadrar nos valores propostos na literatura será analisado para os demais ensaios.

· Espalhamento no cone de Abrams (“Slump Flow Test”)

· Concreto com 38 % de volume de pasta

O concreto produzido com 38 % de volume de pasta e RSMG # 300 μm , denominado CAA38, não apresenta um diâmetro final de espalhamento aceitável, de acordo com a Tabela 01, do Capítulo 2, no qual é especificado que o diâmetro de espalhamento final para o CAA deve variar entre 65 cm e 80 cm (EFNARC, 2002). Tendo em vista que o concreto com 38 % de volume de pasta atinge apenas um espalhamento final de 55 cm, constata-se insuficiência de pasta na mistura de concreto. Com relação T_{50} , o resultado é de 7 s, acima do limite especificado pela EFNARC (2002), de 2 s a 5 s. As Figuras 47 (a) e (b) apresentam, respectivamente, o espalhamento final do concreto e o aspecto visual da mistura.

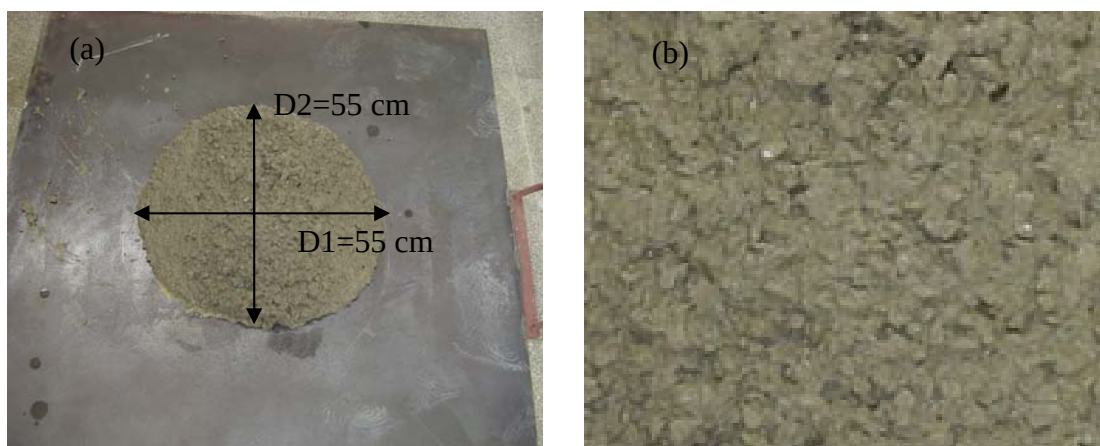


Figura 47 - CAA com 38 % de volume de pasta. (a) – espalhamento final (b) – aspecto visual.

- Concreto com 40 % de volume de pasta

O concreto produzido com 40 % de volume de pasta e RSMG # 300 μm , denominado CAA40, apresenta resultados satisfatórios quanto ao espalhamento e ausência de segregação, com um espalhamento final médio de 67 cm, se enquadrando nos parâmetros exigidos pela EFNARC (2002), que é de 65 cm a 80 cm. Com relação ao T_{50} , o resultado é de 2,4 s, se enquadrando dentro do limite especificado pela EFNARC (2002), de 2 s a 5 s. As Figuras 48 (a) e (b) ilustram o resultado do ensaio.

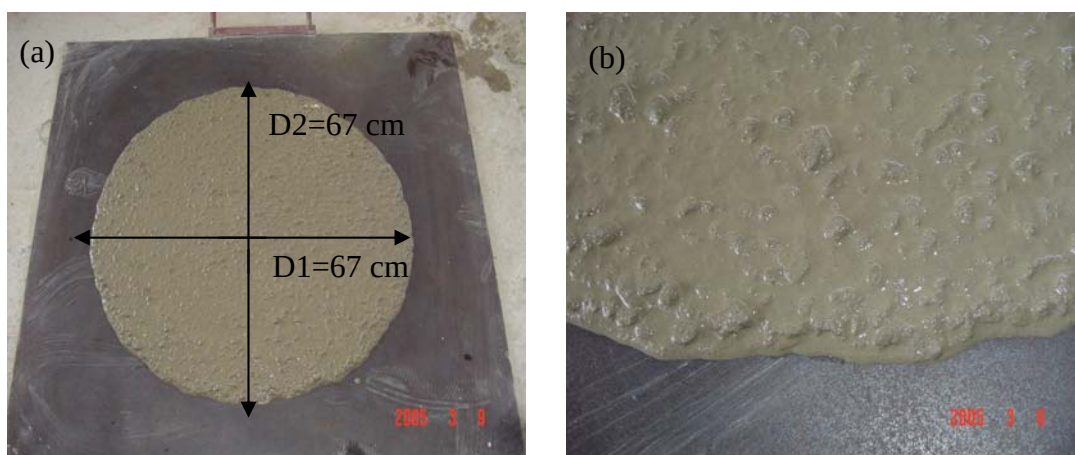


Figura 48 - CAA com 40 % de volume de pasta (a) – espalhamento final. (b) – aspecto visual

- Concreto com 42 % de volume de pasta

A mistura produzida com 42 % de volume de pasta e RSMG # 300 μm , denominado CAA42, apesar de atingir um espalhamento final de 67,5 cm, de acordo com a Figura 49, atendendo às exigências apresentadas na literatura técnica para considerado auto-adensável, de 65 a 80 cm (EFNARC, 2002). Com relação ao T_{50} , o resultado é de 1,8 s, abaixo do limite especificado pela EFNARC (2002), de 2 s a 5 s.

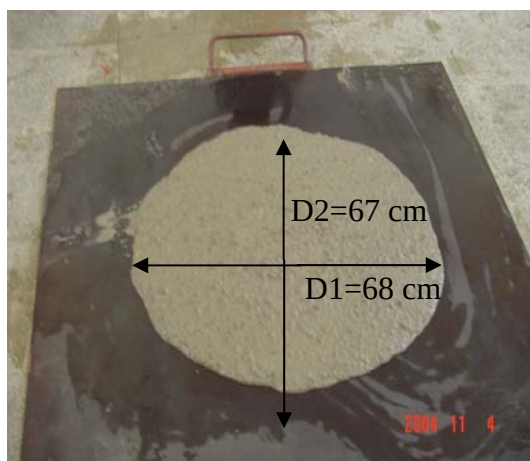


Figura 49 – CAA com 42 % de volume de pasta

A Tabela 13 apresenta os resultados dos ensaios de espalhamento no cone de Abrams, dos três concretos produzidos neste estudo: CAA38, CAA40 e CAA42.

Tabela 13 – Ensaio de espalhamento para diferentes CAA.

Ensaio no estado fresco		
CAA (Volume de pasta)	D_{final} (cm)	T₅₀ (s)
CAA38	55,0	7,0
CAA40	67,0	2,4
CAA42	67,5	1,8

A partir da Tabela 13, é verificado que o CAA40 apresenta o melhor resultado com relação ao espalhamento final e o T₅₀, atendendo assim aos requisitos de habilidade de fluidez do concreto auto-adensável, sem presença de segregação.

A fim de comparar o CAA40 com o de Lisboa (2004), denominado CAA42, a Tabela 14 apresenta um resumo com os resultados do espalhamento final no cone de Abrams e do T₅₀.

Tabela 14 – Ensaio de espalhamento no cone de Abrams, para diferentes CAA.

CAA		
Composição	CAA40	CAA42
Adição mineral	RSMG # 300 µm	RSMG # 600 µm
Espalhamento final (cm)	67	77
T ₅₀ (s)	2,40	0,81

A partir dos resultados apresentados na Tabela 14, é verificado que o CAA40 apresenta resultados que se enquadram nas faixas de intervalos apresentadas na literatura, para que o concreto seja considerado como auto-adensável, tanto para o espalhamento final quanto para o T₅₀. Com relação ao CAA42, o espalhamento final é atendido, mas o T₅₀ apresenta-se com valor baixo. Isto significa dizer que o concreto se apresenta com alta velocidade de fluxo, mas com tendência a uma baixa coesão na mistura.

Com relação ao aumento no espalhamento final do CAA42, com relação ao CAA40, é observado que o aumento do volume de pasta provoca uma maior fluidez no concreto, aumentando assim o espalhamento final, de 67 cm para 77 cm.

No entanto, o CAA40 é submetido aos demais ensaios citados no Capítulo 3, a fim de verificar se o concreto atende às demais características do concreto auto-adensável. Com isso, segue a realização e análises destes ensaios.

4.4. Determinação das demais propriedades do CAA40

· Funil V (V-Funnel)

A avaliação da capacidade de preenchimento do concreto auto-adensável é feita através do Funil V. A Tabela 15 mostra o resultado do ensaio do Funil V, para o CAA40, onde é determinado o tempo necessário (T_{final}) para 10 litros da mistura fluir totalmente pela abertura inferior do funil, como mostra a Figura 50.



Figura 50 – Execução do ensaio do Funil V.

Tabela 15 – Resultado do ensaio do Funil V.

Funil V	
T_{final}	10 s

Segundo Gomes (2002), o concreto para ser considerado um auto-adensável, deve apresentar um tempo final de fluxo do CAA, no Funil V, na faixa de 10 ± 3 s. Já para a EFNARC (2002), este tempo deve ficar na faixa de 6 a 12 s. Portanto, o CAA40 atendeu a especificação para concreto auto-adensável.

Com relação ao CAA42 produzido por Lisboa (2004), o tempo necessário para o concreto fluir ao longo do Funil V é de 6 s, atendendo também aos parâmetros da literatura técnica. Esta redução considerável no tempo confirma o resultado obtido para o espalhamento no cone de Abrams, ou seja, o CAA40 apresentando menor velocidade de fluxo e possivelmente melhor coesão na mistura, devido a menor dimensão dos grãos do RSMG.

· Caixa L (L-Box)

Como avaliação da capacidade de passagem através de obstáculos, é utilizado o ensaio da Caixa L, como mostram as Figuras 51 (a) e (b). A Tabela 16 apresenta os resultados alcançados.



Figura 51 (a) e (b) - Execução do ensaio da Caixa L (L-Box).

Tabela 16 – Resultados do ensaio da Caixa L (L-Box).

Caixa L	
TL ₂₀ (s)	1,2
TL ₄₀ (s)	2,0
H ₁ (cm)	10,0
H ₂ (cm)	8,0
H ₂ /H ₁	0,8

Segundo Gomes (2002), o concreto só pode ser considerado como auto-adensável se $TL_{20} = 1 \pm 0,5$ s, $TL_{40} = 1,5$ a 3 s e $H_2/H_1 = 0,8$ a 0,85. Já para a EFNARC (2002), $H_2/H_1 = 0,8$ a 1. Percebe-se então que o CAA40 et al. atende aos parâmetros da Caixa L exigidos na literatura técnica, para concreto auto-adensável.

Comparando com o concreto CAA42 de Lisboa (2004), é verificado também uma boa capacidade de passagem, a partir dos resultados apresentados: $TL_{20} = 0,75$ s e 1,06 s; $TL_{40} = 1$ s e 2,21 s; R.B. = 0,98 e 0,89.

· Tubo U

A avaliação da resistência à segregação do CAA40 é feita através do ensaio do Tubo U. São retiradas três amostras de trechos determinados do tubo, efetuando-se relações entre a massa de agregado gráudo da amostra 01 (amostra de referência) e as massas de agregado gráudo das amostras 02 e 03. A razão de segregação (R.S.) é a menor dos dois valores. Para $R.S. \geq 0,90$, a segregação é considerada desprezível (GOMES, 2002). A Figura 52 ilustra o ensaio no momento

anterior à extração das três amostras e a Tabela 17 apresenta os resultados do ensaio do Tubo U.

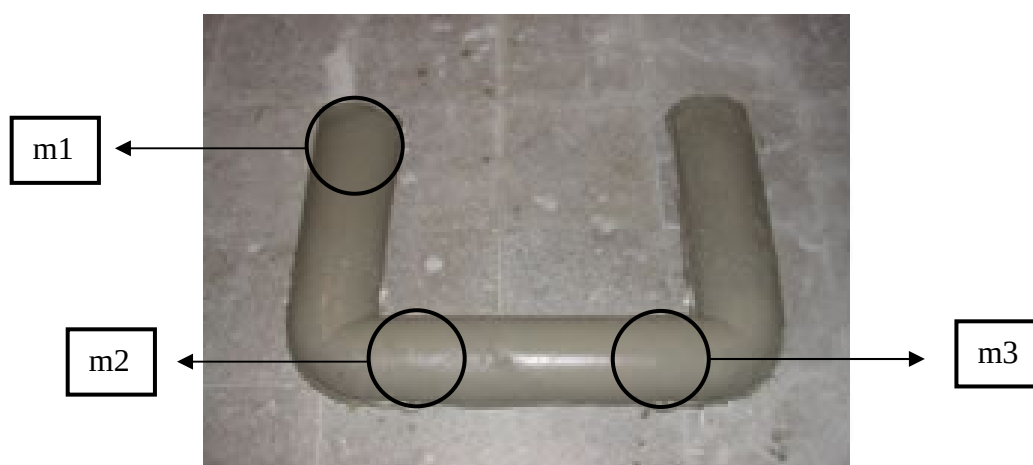


Figura 52 – Execução do ensaio do Tubo U.

Tabela 17 – Resultados do ensaio do Tubo U

Tubo U	
Massa da amostra	R.S.
$m_1 = 1359,2$ g (Amostra de referência)	Amostra de referência
$m_2 = 1226,0$ g	$m_2/m_1 = 0,902$
$m_3 = 1258,3$ g	$m_3/m_1 = 0,925$

De acordo com os resultados apresentados na Tabela 17, é verificado que os valores obtidos para R.S. satisfazem ao limite proposto por Gomes (2002), que é $\geq 0,9$. Isto significa que o CAA40 não apresenta sinais de segregação.

Com relação ao CAA42 de Lisboa (2004), foi encontrado um valor de 0,92 para R.S., atendendo também ao limite proposto por Gomes (2002).

· Teste de auto-adensabilidade

O ensaio é usado para comprovar a auto-adensabilidade do CAA40. Como resultado mostrado na Figura 53, o concreto atende a exigência de um concreto auto-adensável, não sendo constatado nenhum tipo de bloqueio entre as barras do equipamento, quando usado para preencher uma placa estrutural.

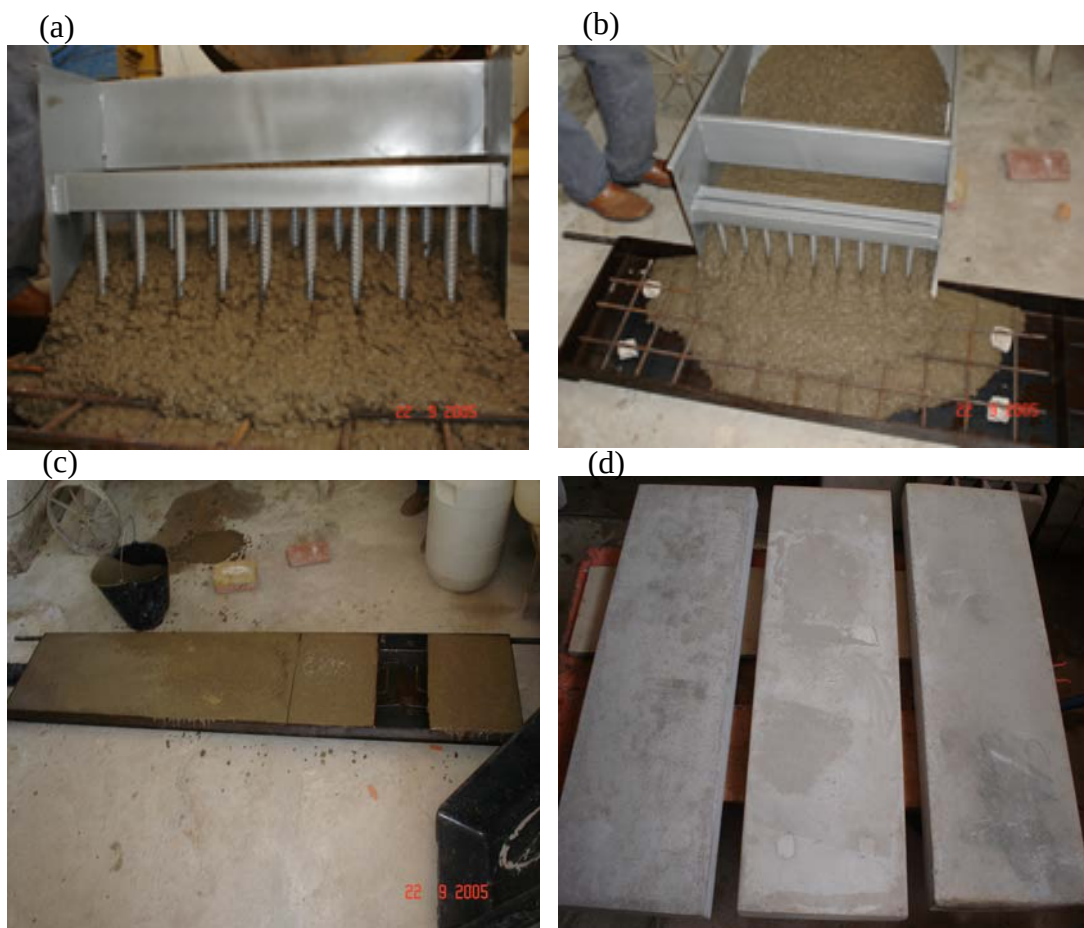


Figura 53 – Ensaio de auto-adensabilidade do CAA para preenchimento de placa estrutural.

Após as análises dos resultados apresentados, que avaliam as propriedades frescas do CAA, pode-se constatar que o CAA40, pode ser caracterizado como auto-adensável. Um resumo geral dos resultados apresentados neste capítulo, para o CAA40, são apresentados na Tabela 18.

Tabela 18 – Características de auto-adensabilidade do CAA40

Ensaio no estado fresco – CAA40 com RSMG # 300 μm		
Espalhamento final (cm)		67
Funil V (s)		10
T_{50} (s)		2,40
Caixa L	TL_{20}	1,20
	TL_{40}	2
$R.B.=H_2/H_1$		0,80
Tubo em U (R.S.)		0,91

O CAA40 e o concreto convencional são utilizados para estudo das propriedades no estado endurecido, como: propriedades mecânicas, evolução e relação das mesmas, absorção e índice de vazios. Estas propriedades são

comparadas com àquelas obtidas no concreto convencional, cuja produção desse concreto será apresenta a seguir.

4.5. Produção do concreto convencional

Neste trabalho é produzido um concreto convencional, a fim de comparar algumas de suas propriedades com a do CAA40, como: resistência à compressão e a tração, módulo de determinação longitudinal, absorção e índice de vazios. Este concreto convencional é constituído dos mesmos materiais utilizados na produção do CAA estudado, com exceção do RSMG e do aditivo superplastificante, que não são utilizados.

São mantidas as mesmas relações consideradas para o CAA, tais como: $a/c = 0,5$, dosagem de cimento e relação entre os agregados.

A dosagem do concreto convencional é obtida através do CAA desenvolvido neste trabalho, onde a quantidade de RSMG é substituída em partes iguais entre os agregados que compõem a mistura (50 % areia e 50 % brita), em massa. Para promover a trabalhabilidade da mistura, visto que tal concreto apresenta uma grande quantidade de cimento, ainda é utilizado 0,65 % de aditivo plastificante em relação à massa de cimento. Os cálculos realizados para obtenção da dosagem do concreto convencional, a partir do CAA estudado neste trabalho, são descritos a seguir.

a) Quantidade de fíler - RSMG

$$\text{RSMG} = 50 \% \text{ da quantidade de cimento} = 0,5 \times 392,1 \text{ Kg/m}^3 = 196,1 \text{ kg/m}^3$$

Tal quantidade é dividida igualmente para areia e brita, em massa, como cita o item b.

b) Quantidade de areia e brita

$$\text{Areia} = 783,3 + (196,1 / 2) = 881,4 \text{ kg/m}^3$$

$$\text{Brita} = 795 + (196,1 / 2) = 893,1 \text{ kg/m}^3$$

c) Água de absorção

$$\text{Absorção da areia} = 0,006 (0,6 \%).$$

$$\text{Absorção da brita} = 0,0082 (0,82\%).$$

Logo,

$$\text{Água}_{\text{abs}} = (881,4 \times 0,006) + (893,1 \times 0,0082) = 12,6 \text{ kg/m}^3$$

d) Quantidade de água do aditivo plastificante

A quantidade de água contida na solução do aditivo plastificante (A_{plast}) é determinada de modo a ser descontada da água da mistura, com isso, a relação $a/c = 0,5$ foi mantida. Através de dados fornecidos pelo fabricante, obteve-se que: Teor de sólidos do aditivo plastificante (t_s) = 36 %. Além disso, o consumo de cimento ($cc = 392,1 \text{ kg/m}^3$) não é variado e a relação plastificante/cimento (p/c) é fixada em 0,65 %.

Logo, a água contida na solução do plastificante, de acordo com a Equação 08 é:

$$A_{\text{plast.}} = (p / c) \cdot \left(\frac{100}{(ts)} - 1 \right) \cdot (cc) \quad (08)$$

$$\therefore A_{\text{plast.}} = \frac{0,65}{100} \cdot \left(\frac{100}{36} - 1 \right) \cdot 392,1 = 4,531 \text{ kg / m}^3$$

e) Água

Com a relação $a/c = 0,5$, parte desta água ($a/c' = 0,4$) é utilizada para ser inicialmente adicionada à mistura (A_i) antes da colocação do aditivo. O restante da água de amassamento (A_c), ou seja, $a/c'' = 0,1$, é adicionada posteriormente, assim como o superplastificante. Portanto, é feita a subtração entre o restante da água de amassamento e a água já contida na solução do aditivo, de modo a evitar o excesso de água na mistura do concreto.

$$A_i = (a / c' = 0,4) \cdot 392,1 = 156,84 \text{ kg / m}^3$$

$$A_c = A(a / c'' = 0,1) - A_{\text{plast.}} = 392,1 \cdot 0,1 - 4,531 = 34,68 \text{ kg / m}^3$$

f) Aditivo plastificante

A quantidade sólida do aditivo adicionada à mistura, de acordo com a Equação 09 é:

$$\text{Plast.} = (p / c) \times (cc) \quad (09)$$

Onde $p/c = 0,65 \%$ e $cc = 392,1 \text{ kg/m}^3$.

$$\therefore Plast. = \left(\frac{0,65}{100} \right) \cdot 392,1 = 2,549 \text{ kg / m}^3$$

Portanto, a dosagem obtida para o concreto convencional (C.C.) é apresentada na Tabela 19.

Tabela 19 – Dosagem do concreto convencional.

C.C.	kg/m³
Cimento	392
Areia	881
Brita	893
Água de absorção	13
Água inicial ($a/c' = 0,4$)	157
Plastificante ($p/c = 0,65 \%$)	2,5
Água final	35

Com a produção deste concreto convencional, foi realizado o ensaio de abatimento no tronco de cone (Slump test) para concretos convencionais, de acordo com a NBR 5738/03. Quanto à classificação do concreto convencional quanto à sua consistência, de acordo com a NBR 7223/92, o concreto obtido neste trabalho apresentou um abatimento no tronco de cone (Slump test) de 15 cm, o qual pode ser classificado como convencional medianamente fluido, de acordo com a Tabela 20.

Tabela 20 – Classificação do concreto convencional quanto à sua consistência. (NBR 7223/92)

Classificação dos concretos convencionais quanto à sua consistência	
Classificação do concreto	Abatimento - Slump test (mm)
Seco	0 a 20 mm (+ 5 mm)
Medianamente plástico	30 a 50 mm (+ 10 mm)
Plástico	60 a 90 mm (+ 10 mm)
Medianamente fluido	100 a 150 mm (+ 20 mm)
Fluido ou líquido	> 160 mm (+ 30 mm)

Tal concreto é considerado como medianamente fluido, devido à presença do plastificante, mas convencional, como mostra a Figura 54.



Figura 54 – Ilustração do abatimento no cone de Abrams para o concreto convencional.

Diante disso, algumas propriedades mecânicas deste concreto convencional, como: f_c , f_t e E_c , serão determinadas, a fim de analisar tais resultados com os de um concreto auto-adensável. Essas análises são importantes, pois, é possível de constatar as similaridades e discrepâncias existentes no comportamento de tais concretos. Esse estudo é apresentado no Capítulo 5.

Com relação ao CAA40 produzido, pode-se constatar que o mesmo apresentou propriedades de auto-adensabilidade, atendendo assim aos parâmetros exigidos para o concreto ser caracterizado como auto-adensável, como: sp/c , volume de pasta, propriedades de espalhamento, capacidade de preenchimento e passagem entre os obstáculos, sem presença de segregação e/ou exsudação. Diante disso, um estudo de suas propriedades no estado endurecido é necessário, a fim de viabilizar a sua aplicação, no que diz respeito principalmente, à resistência e durabilidade.

CAPÍTULO 5

Propriedades do CAA no estado endurecido

5.1. Considerações Iniciais

Assim como as propriedades de auto-adensabilidade do CAA devem ser verificadas, para garantir que os benefícios esperados na etapa de execução do concreto sejam alcançados, as propriedades mecânicas do CAA também, a fim de atender aos requisitos de resistência e durabilidade especificados no projeto.

Como já foi dito anteriormente no Capítulo 2, algumas propriedades do concreto no estado endurecido são parâmetros importantes em análises estruturais, tais como: Resistência à compressão e à tração, Módulo de deformação estático (Módulo de deformação longitudinal), Fluência, Retração, Ductilidade, Tenacidade, dentre outras. Das propriedades citadas, as mais verificadas para atendimento aos projetos estruturais, bem como para controle tecnológico, são: Resistência à compressão e à tração e o Módulo de deformação estático (Módulo de deformação longitudinal). Tais propriedades são determinadas através de ensaios simples, com resultados obtidos em curta duração. Dentro desse contexto, tais propriedades são determinadas e analisadas nesse trabalho.

A obtenção dessas propriedades depende de vários fatores. Dentre eles, os que diferenciam do concreto convencional com relação ao CAA, são: composição da mistura, formação da microestrutura e moldagem do concreto. As diferenças na composição e na microestrutura, com relação ao concreto convencional, são tratadas no capítulo anterior, porém, com relação à moldagem de c.p., no que diz respeito à não vibração do concreto, é necessário verificar se o procedimento de moldagem adotado para o CAA é suficiente para adensar o concreto e evitar o acúmulo de vazios na estrutura interna do mesmo sem alterar suas propriedades.

Nesse capítulo é apresentado um estudo prévio do procedimento de moldagem de c.p., usado para determinação dessas propriedades. O estudo consiste em analisar a forma de colocação do CAA nos moldes, levando em consideração a prática de lançamento de tal concreto, e a sua eficiência quanto à garantia do seu adensamento. Definido o procedimento de moldagem dos c.p., as

propriedades mecânicas, tais como: resistência à compressão e à tração e o módulo de deformação longitudinal são determinadas e analisadas para o CAA selecionado no capítulo anterior, para as idades de 03, 07, 28 e 91 dias. Para cada idade, são moldados 11 c.p., dos quais: quatro para f_c , quatro para f_t e três para E_c , e comparadas com aquelas alcançadas no concreto convencional. Como continuação do estudo de tais propriedades, a evolução de f_c , f_t e E_c , assim como a obtenção de equações que expressam a relação de f_t e E_c em função de f_c também é apresentada.

5.2. Verificação da auto-adensabilidade do CAA

No concreto convencional, o processo de adensamento que garante a compactação do concreto, é realizado através de equipamentos mecânicos. Já no CAA, esse processo é conseguido apenas pelo seu peso próprio. É conhecido na literatura técnica que um mau adensamento do concreto acarreta numa grande quantidade de vazios, diminuindo assim as resistências do concreto.

Portanto, a fim de verificar se os c.p. preenchidos com CAA estão bem adensados, isto é, se o auto-adensamento realmente garantiu a compactação do mesmo, sem trazer prejuízos às suas resistências, são moldados vinte c.p. cilíndricos de 15 cm de diâmetro x 30 cm de altura, lançando o CAA de uma única vez, onde dez são adensados mecanicamente em mesa vibratória, até o concreto nivelar com o topo do molde, e os outros dez não vibrados. Esses c.p. são analisados através do rompimento à compressão para determinação de f_c e f_t . *“É importante salientar que este estudo verifica se o CAA produzido, denominado CAA40, apresenta boa capacidade de auto-adensabilidade no c.p., quando comparado ao c.p. moldado com CAA vibrado mecanicamente”. Isto significa dizer que o CAA não necessita de nenhum tipo de vibração mecânica.*

Tal estudo é realizado para comparar os valores de f_c e f_t dos c.p. moldados, sem e com vibração. O aspecto visual, após o rompimento dos c.p. por compressão diametral, na superfície de ruptura da também é verificado.

Nas Tabelas 21 e 22 são apresentados os resultados de f_c e f_t , aos 07 dias, para c.p. cilíndricos com dimensões de 15 cm x 30 cm, assim como suas respectivas médias, o desvio padrão entre a média e os valores encontrados na amostra (D.P.) e o coeficiente de variação (C.V.).

Tabela 21 – Resistência à compressão de CAA não vibrado e vibrado.

CAA não vibrado (f_c - MPa)	CAA vibrado (f_c - MPa)
25,0	24,6
25,0	24,9
25,2	25,5
26,2	26,4
26,4	26,6
Média = 25,6	Média = 25,6
D.P. = 0,5	D.P. = 0,8
C.V. (%) = 1,8	C.V. (%) = 3,0

Tabela 22 – Resistência à tração indireta de CAA não vibrado e vibrado.

CAA não-vibrado (f_t - MPa)	CAA vibrado (f_t - MPa)
2,0	1,9
2,1	2,0
2,1	2,0
2,2	2,1
2,2	2,3
Média = 2,2	Média = 2,1
D.P. = 0,1	D.P. = 0,1
C.V. (%) = 3,5	C.V. (%) = 6,4

A partir das Tabelas 21 e 22, é verificado que a média das resistências à compressão e à tração indireta praticamente não variam entre o CAA não vibrado e o vibrado. No entanto, a variação estatística dos valores das resistências encontradas nos c.p. do CAA vibrado apresenta-se consideravelmente maior com relação ao concreto não vibrado, possivelmente decorrente do problema da segregação no concreto. Tais variações são toleráveis pelos estatísticos, que é de até 10 %. (MARTINS, 2005).

A Figura 55 mostra que o aspecto visual dos c.p. cilíndricos de 15 cm x 30 cm não vibrados, moldados com o CAA40, apresentam uma boa distribuição dos poros, com ausência de segregação e/ou bicheiras. Isto mostra que este concreto apresenta uma boa capacidade de auto-adensabilidade nesta verificação.



Figura 55 – Aspecto visual do c.p. 15 cm x 30 cm moldado com o CAA não vibrado.

Na Figura 56 é apresentada a distribuição do agregado graúdo na seção de ruptura à compressão diametral de c.p. cilíndricos 15 cm x 30 cm de CAA vibrado, após o ensaio de resistência à tração indireta.



Figura 56 – Aspecto visual da superfície de ruptura do c.p. 15 cm x 30 cm com CAA vibrado

A partir da Figura 56 é observada a presença de segregação dos agregados, onde se vê pouco agregado graúdo na parte superior do c.p. e uma maior concentração do meio para base.

Embora tenha havido alteração na distribuição granulométrica do CAA nos c.p. cilíndricos 15 cm x 30 cm não vibrados e vibrados, os resultados médios de f_c e f_t não sofreram variações consideradas. Isto mostra que o CAA garantiu suas propriedades de auto-adensabilidade.

5.3. Procedimento de moldagem em c.p. cilíndricos de CAA

Sendo um dos objetivos do trabalho a determinação das propriedades mecânicas do CAA, através do ensaio em c.p. cilíndricos, e considerando que a moldagem do mesmo pode influenciar nos resultados alcançados, um estudo prévio para verificação da forma de moldagem de c.p. cilíndricos de CAA, para diferentes tamanhos de moldes, é realizado através da resistência à compressão, a fim de avaliar o método de colocação do concreto no c.p. Para tal, são moldados no total dez c.p. cilíndricos de 10 cm x 20 cm, dos quais cinco preenchidos de uma só vez,

isto é, se preenchia um até o topo para depois preencher o outro e assim sucessivamente até completar os cinco, e os outros cinco em duas etapas: primeiro se preenchia os cinco até a metade da altura do molde e depois completava a outra metade; enquanto para os c.p. com dimensões de 15 cm x 30 cm são moldados doze, quatro preenchidos de uma só vez, quatro em duas etapas e quatro em três etapas, seguindo o mesmo procedimento adotado para o c.p. 10 cm x 20 cm.

O procedimento de desmoldagem, cura, capeamento e rompimentos dos c.p. cilíndricos de 10 cm x 20 cm e 15 cm x 30 cm seguiram o procedimento prescrito no Capítulo 3.

Na Tabela 23, são apresentados os resultados de resistência à compressão do CAA estudado, em c.p. cilíndricos de 10 cm x 20 cm, aos 07 dias de idade, bem como a média e os valores de D.P. e C.V.

Tabela 23 – Valores de f_c , em c.p. cilíndricos de 10 cm x 20 cm, variando a moldagem.

f_c (MPa) - CAA moldado de uma só vez	f_c (MPa) - CAA moldado em duas etapas
30,0	30,1
31,1	31,0
31,2	31,2
31,3	31,6
31,8	31,8
Média = 31,1	Média = 31,1
D.P. = 0,6	D.P. = 0,6
C.V. (%) = 2,1	C.V. (%) = 2,1

De acordo com a Tabela 23, pode-se constatar que não houve alteração nos valores médios de f_c determinados em c.p. de 10 cm x 20 cm moldados de uma só vez ou em duas etapas. É também verificado que os valores de D.P. e C.V. apresentaram valores bastante próximos, com variação insignificante, sendo tolerável pelos estatísticos. (MARTINS, 2005).

Isto significa dizer que, devido a maior praticidade e produtividade na moldagem, os c.p. cilíndricos de 10 cm x 20 cm moldados com CAA podem ser preenchidos de uma só vez, não influenciando no resultado do ensaio para a determinação das propriedades mecânicas do concreto. As resistências à compressão são determinadas seguindo o procedimento apresentado no Capítulo 3.

Após as análises e resultados obtidos para c.p. de 10 cm x 20 cm, são moldados c.p. de 15 cm x 30 cm e rompidos aos 07 dias, de acordo com a Tabela 24, a fim de analisar se o procedimento de moldagem do mesmo têm influência nas

propriedades mecânicas do CAA. A Tabela 23 apresenta os resultados de f_c , com suas respectivas médias, e os valores de D.P. e C.V.

Tabela 24 – Valores de f_c , em c.p. cilíndricos de 15 cm x 30 cm, variando a moldagem.

f_c (MPa)-CAA moldado de uma só vez	f_c (MPa)-CAA moldado em duas etapas	f_c (MPa)-CAA moldado em três etapas
24,1	28,5	24,9
24,2	28,6	25,0
25,3	28,9	25,1
25,5	29,1	25,2
26,6	29,4	25,5
Média = 25,3	Média = 28,9	Média = 25,1
D.P. = 1,0	D.P. = 0,4	D.P. = 0,2
C.V. (%) = 4,1	C.V. (%) = 1,3	C.V. (%) = 0,9

A partir dos resultados obtidos na Tabela 24, a maior resistência à compressão é obtida em c.p. preenchidos em duas etapas. O aumento foi de 12,5 % em relação ao colocado em uma só vez e 13,3 % em relação ao colocado em três etapas. Com relação aos valores de D.P. e C.V., os melhores resultados apresentados são para c.p. moldados em duas ou três etapas, com menores variações. A partir da análise conjunta dos resultados, observa-se uma melhoria na resistência à compressão em c.p. moldados em duas camadas, pois, apresentam maior resistência à compressão, e menor D.P. e C.V.

Os resultados das Tabelas 23 e 24 mostram que a forma de colocação do CAA em c.p. cilíndricos de 10 cm x 20 cm e 15 cm x 30 cm não diferem daqueles exigidos na NBR 5738, que trata do número de camadas para moldagem de c.p. adensados por vibração mecânica, isto é, uma camada para c.p. cilíndricos de 10 cm x 20 cm e duas camadas para c.p. cilíndricos de 15 cm x 30 cm.

Com relação aos resultados apresentados nas tabelas, é observado que:

- Para o CAA moldado de uma única vez, é observada uma redução de 19 % na resistência média à compressão, para os c.p. 15 cm x 30 cm (25,3 MPa), com relação aos de 10 cm x 20 cm (31,1 MPa), ou seja, a resistência à compressão dos c.p. 15 cm x 30 cm equivalente a 81 % da resistência à compressão em c.p. de 10 cm x 20 cm.
- Para o CAA moldado em duas etapas, é observada uma redução de 7 % na resistência média à compressão para os c.p. 15 cm x 30 cm (28,9 MPa), com relação aos de 10 cm x 20 cm (31,1 MPa), ou seja, a resistência à compressão dos c.p. 15 cm x 30 cm equivalente a 93 % da resistência à compressão em c.p. de 10 cm x 20 cm.

Tais resultados são coerentes com relação aos apresentados na literatura técnica, como citado no Capítulo 2.

É importante salientar que as análises e resultados apresentados neste trabalho ainda são restritos, quando comparados ao grau de complexidade do tema. Seriam necessárias análises estatísticas, com grande quantidade de amostras, para que o resultado apresentasse maior confiabilidade. No entanto, pode-se dizer que tal estudo é de fundamental importância para mostrar que o procedimento, etapas de moldagem do CAA, bem como a geometria do elemento estrutural influencia nos resultados. Para tais estudos, o CAA atende ao mesmo procedimento de moldagem para concretos convencionais com vibração mecânica, que é em apenas uma camada.

5.4. Determinação das propriedades mecânicas

· Resistência à compressão (f_c)

Para a determinação de f_c do CAA40, são moldados quatro c.p. cilíndricos de 10 cm x 20 cm e rompidos nas idades de 03, 07, 28 e 91 dias, respectivamente. A Tabela 25 apresenta as médias dos valores de f_c , bem como o D.P. e C.V.

Tabela 25 – Valores de f_c , em c.p. cilíndricos de 10 cm x 20 cm, para o CAA40.

c.p.	CAA40 - f_c (MPa) com as idades (dias)			
	03 dias	07 dias	28 dias	91 dias
01	23,0	31,1	35,2	36,7
02	24,4	31,2	36,6	37,0
03	26,2	31,3	37,8	40,0
04	26,8	31,8	37,6	42,0
Média	25,1	31,3	36,8	38,9
D.P.	1,7	0,3	1,2	2,5
C.V. (%)	6,9	1,0	3,2	6,5

De acordo com a Tabela 25, as resistências médias à compressão encontradas para o CAA40 variam de 25,1 MPa, aos 3 dias, a 38,9 MPa, aos 91 dias de idade, apresentando um ganho de 55 % (13,8 MPa) na resistência. Com relação aos valores encontrados para D.P. e C.V., não há variação considerável, sendo tolerável pelos estatísticos (MARTINS, 2005).

A título de comparação, é apresentada a Tabela 26, com as resistências médias à compressão do CAA40 estudado, e do CAA42 de Lisboa (2004).

Tabela 26 – Médias dos valores de f_c para CAA40 e CAA42, em c.p. 10 cm x 20 cm.

Idade (dias)	Valores de f_c (MPa) para CAA40 e CAA42.	
	CAA40	CAA42
03	25,1	xxx
07	31,3	30,6
28	36,8	38,9
91	38,9	xxx

É verificado que a resistência à compressão para o CAA40 com RSMG # 300 μm , apresenta uma variação de + 2,2 % aos 07 dias e de - 5,7 % aos 28 dias, com relação ao CAA42, com RSMG # 600 μm . Pode-se então constatar que o CAA40 apresenta comportamento similar ao CAA42, no que diz respeito à resistência à compressão aos 07 e 28 dias.

Os resultados apresentados mostram que as modificações feitas na granulometria do RSMG influenciam nas resistências à compressão do CAA, visto que, o CAA40 apresenta valores de f_c próximos aos do CAA42, com maior volume de pasta e, conseqüentemente, maior consumo de cimento.

Com relação ao concreto convencional, são obtidos valores para f_c , em quatro c.p. cilíndricos de 10 cm x 20 cm, aos 07 e 28 dias, de acordo com a Tabela 27, com sua respectiva média, D.P. e C.V.

Tabela 27 – Valores de f_c para o concreto convencional, em c.p. 10 cm x 20 cm.

c.p.	f_c (MPa)	
	07 dias	28 dias
01	22,8	30,3
02	23,3	33,0
03	25,1	33,1
04	20,2	33,0
Média	22,8	32,3
D.P.	2,0	1,4
C.V. (%)	8,8	4,2

Comparando os resultados do CAA40 com o concreto convencional, é verificado:

- Um ganho de 36,8 % na resistência à compressão do CAA40 (31,3 MPa), com relação ao concreto convencional (22,8 MPa), aos 07 dias. Isto constata que o aumento na quantidade de finos também influencia nos valores de f_c .
- Já aos 28 dias, é observado um ganho de 13,9 % na resistência média à compressão do CAA40 (36,8 MPa), quando comparado ao concreto convencional (32,3 MPa).

- Com relação ao D.P. e C.V., os melhores resultados, ou seja, com menores variações, se apresentam nas idades de 07 e 28 dias, enquanto as maiores, aos 03 e 91 dias.

Analisando agora os resultados apresentados de f_c com os da literatura técnica, é constatado que:

Os resultados encontrados para f_c , no trabalho de Klug (2003), são significativamente maiores para o CAA, em torno de 40 %, quando comparados ao concreto convencional. A relação encontrada neste trabalho é bastante similar (36,8 %). Para Felekoglu (2003), o CAA apresenta maiores valores para a resistência à compressão que o concreto convencional, confirmando o que foi citado por Klug (2003) e também obtido neste trabalho.

· Resistência à tração (f_t)

A determinação de f_t no CAA40 é feita através do rompimento à compressão diametral ou tração indireta, em quatro c.p. cilíndricos de 10 cm x 20 cm, nas idades de 03, 07, 28 e 91 dias, respectivamente. A Tabela 28 apresenta os valores de f_t , bem como as médias, o D.P. e o C.V.

Tabela 28 – Valores de f_t , em c.p. cilíndricos 10 cm x 20 cm, para o CAA40.

c.p.	CAA40 - f_t (MPa)			
	03 dias	07 dias	28 dias	91 dias
01	2,6	2,6	4,4	4,4
02	2,3	2,7	4,3	4,4
03	2,4	2,5	4,0	4,3
04	2,7	2,7	4,1	4,5
Média	2,5	2,6	4,2	4,4
D.P.	0,2	0,1	0,2	0,1
C.V. (%)	7,2	3,6	4,3	1,9

As médias das resistências à tração indireta (f_t) variam de 2,5 MPa (03 dias), para 4,4 MPa (91 dias), o que corresponde a um ganho de resistência de 76 %. Tais valores mostram que os ganhos de f_t se comportam de forma diferente daqueles obtidos para f_c (55 %). Porém, tal comportamento também ocorre no estudo de Klug et al. (2003), que verifica um maior crescimento de f_t com relação à f_c ao longo das idades, nos concretos auto-adensáveis.

Com relação aos valores de D.P. é observado que as médias em relação aos valores de f_t não apresentam diferenças significativas. Já com relação ao C.V.

verifica-se que, apenas na idade de 03 dias, é ligeiramente alto, embora tolerável pelos estatísticos, que é até uma variação de 10 %. (MARTINS, 2005).

A Tabela 29 apresenta os valores de f_t , aos 28 dias, para o CAA40 e o CAA42.

Tabela 29 – Valores de f_t , aos 28 dias, em c.p. 10 cm x 20 cm, do CAA40 e CAA42.

c.p.	f_t (MPa)	
	CAA40	CAA42
01	4,4	2,6
02	4,3	2,7
03	4,0	2,9
04	4,1	xxx
Média	4,2	2,7

Comparando os resultados apresentados na Tabela 29, pode-se constatar um ganho de 53,8 % para o CAA40, quando comparado ao CAA42. Os resultados apresentados mostram que a modificação na granulometria do RSMG influencia na resistência à tração do CAA. É importante salientar que a comprovação da influência dos finos no aumento de f_t , apresentada neste item, necessita de uma análise mais ampla, com várias idades e grande quantidade de amostras, para que os resultados sejam mais confiáveis.

· Módulo de deformação estático (E_c)

Para a análise dos resultados do módulo de deformação estático ou módulo de deformação longitudinal do CAA40, a Tabela 30 apresenta os resultados em três c.p. cilíndricos de 10 cm x 20 cm, aos 03, 07, 28 e 91 dias.

Tabela 30 – Valores de E_c , em c.p. cilíndricos de 10 cm x 20 cm, para o CAA40.

c.p.	E_c (GPa)			
	03 dias	07 dias	28 dias	91 dias
01	25,7	30,1	34,5	36,3
02	26,8	30,3	33,9	34,9
03	28,8	30,2	36,6	35,3
Média	27,1	30,2	35,0	35,5
D.P.	1,5	0,1	1,4	0,7
C.V. (%)	5,7	0,2	4,0	2,0

As médias dos valores de E_c , em c.p. cilíndricos 10 cm x 20 cm, variam de 27,1 GPa, aos 03 dias, para 35,5 GPa, aos 91 dias, o que corresponde a um ganho no módulo de deformação longitudinal do concreto de 30,9 %, bem menor quando

comparado aos ganhos de f_c e f_t , de 55 % e 76 %, respectivamente. Com relação aos valores de D.P. e C.V., são verificadas pequenas variações nos valores de f_c , com relação à média, aos 07 e 91 dias, e maiores variações aos 03 e 28 dias, embora tolerável pelos estatísticos, que é até uma variação de 10 %. (MARTINS, 2005).

A Tabela 31 apresenta os valores de E_c para o CAA40 e CAA42, em três c.p. cilíndricos de 10 cm x 20 cm, aos 28 dias.

Tabela 31 – Valores de E_c , aos 28 dias, em c.p. 10 cm x 20 cm, do CAA40 e CAA42.

c.p.	E_c (GPa) - CAA40 e CAA42	
	CAA40	CAA42
01	34,5	29,6
02	33,9	34,1
03	36,6	36,0
Média	35,0	33,2

Analisando os resultados da Tabela 31, pode-se constatar que o CAA40 apresenta comportamento similar ao CAA42, no que diz respeito ao módulo de deformação longitudinal aos 28 dias. Os resultados apresentados mostram que as modificações feitas na granulometria do RSMG (de RSMG # 600 μ m para RSMG # 300 μ m) não influenciam consideravelmente no módulo de deformação longitudinal do CAA.

Os resultados obtidos no CAA40 também são comparados com àqueles encontrados no concreto convencional (C.C.), obtidos em c.p. de 10 cm x 20 cm, aos 07 e 28 dias, de acordo com a Tabela 32.

Tabela 32 – Valores de E_c para o concreto convencional, em c.p. 10 cm x 20 cm.

c.p.	E_c (GPa)	
	C.C. (07 dias)	C.C. (28 dias)
01	28,3	31,6
02	28,4	30,6
03	28,3	29,8
Média	28,3	30,7
D.P.	0,1	0,9
C.V. (%)	0,2	3,0

A partir da Tabela 32, é constatado um pequeno aumento no módulo de deformação longitudinal do concreto convencional, de 8,5 %, dos 07 aos 28 dias. Os valores de D.P. e C.V. são toleráveis segundo os estatísticos (MARTINS, 2005).

Comparando o CAA40 com o concreto convencional, percebe-se um ganho nos valores de E_c , de 6,6 % na idade de 07 dias, e 14 %, na idade de 28 dias. Tal comportamento é similar ao comportamento de alguns estudos apresentados na revisão bibliográfica, onde os resultados de ambos concretos tendem a se aproximarem.

5.5. Evolução e relações das propriedades mecânicas do CAA

5.5.1. Considerações Iniciais

Neste tópico serão apresentadas as evoluções das propriedades mecânicas do CAA estudado (com 40 % de volume de pasta, $a/c = 0,5$; $f/c = 0,5$ e $sp/c = 0,525$), a fim de comparar os resultados encontrados (gráficos e equações experimentais de ajuste) com àquelas encontradas na literatura e/ou fornecidas por normas.

Segundo Klug et al. (2003), o desenvolvimento das resistências do CAA e do concreto convencional com o tempo é similar, no entanto, para o mesmo fator a/c , há uma tendência que o CAA apresente resistências maiores. Já com relação ao módulo de deformação longitudinal, Klug et al. (2003) constata uma diminuição nos resultados do CAA, quando comparados ao concreto convencional, devido a uma maior quantidade de finos e menor quantidade de agregados, que acarreta na redução dos vazios e na porosidade. Já Persson (2001) não percebeu muita diferença comparando o CAA com o concreto convencional. Em CAA de alta resistência, comparado com concreto de alta resistência convencional, para o mesmo nível de resistência, Gomes (2002) não encontrou diferença no módulo de deformação longitudinal.

5.5.2. Evolução das propriedades mecânicas do CAA

O estudo das propriedades mecânicas do CAA, como já foi dito anteriormente, é um assunto em que ainda não existe uma padronização nos resultados, visto que, tais resultados dependem de outros fatores, tais como: microestrutura dos materiais, composição da mistura, procedimento para moldagem de c.p., dentre outros.

As variações nos valores de resistência à compressão e à tração e módulo de deformação longitudinal são notáveis, tanto para os concretos convencionais como para o CAA. No entanto, é importante conhecer tais propriedades em idades mais

avanzadas do concreto, a fim de se verificar se a evolução das propriedades mecânicas do concreto utilizado se enquadra nos resultados apresentados em trabalhos técnicos da literatura e normas desenvolvidas por vários países.

Para o presente trabalho, é obtido um CAA40, no qual se questiona se tal concreto apresenta propriedades mecânicas semelhantes àquelas encontradas para concretos convencionais, visto que, os grandes benefícios do CAA são as suas propriedades no estado fresco (propriedades de auto-adensabilidade).

· Resistência   compressão (f_c)

A resistência   compressão, medida em ensaios de curta duração, é o parâmetro normalmente usado para caracterizar o concreto. A idade tradicionalmente considerada é a de 28 dias, porém, ensaios para as idades de 03 e 07 dias, muitas vezes se fazem necessários devido às exigências construtivas, como por exemplo, em projetos de estruturas pré-moldadas e/ou protendidas, onde freqüentemente existe a necessidade da determinação da resistência   compressão do concreto em idades inferiores a 28 dias. Em estruturas, onde o carregamento total s  atua quando o concreto tem idade superior a 28 dias, visando tirar vantagem do ganho de resistência após esta idade, pode-se adotar o critério de aceitação da resistência na idade de 90 dias. Portanto, o conhecimento da evolução das propriedades do concreto   de fundamental importância para se prever seus valores nas idades solicitadas. Quando os ensaios não são possíveis de serem realizados, as equações que determinam os valores de f_c em outras idades, em função da idade de 28 dias, são utilizadas. Geralmente, tais equações são apresentadas pelas normas, que levam em consideração outros parâmetros, como o tipo de cimento e a relação a/c.

A partir dos resultados obtidos de f_c , aos 03, 07, 28 e 91 dias, para c.p. cilíndricos de 10 cm x 20 cm, e comparando os ganhos de evolução ao longo das idades, verifica-se que o maior ganho foi para a idade de 07 dias, com relação a 03 dias de idade, que foi de 24,0 %; já de 07 dias para 28 dias foi de 17,5 % e de 28 dias a 91 dias foi o menor ganho, de apenas 5,7 %. É observado também que os maiores ganhos de resistências foram nas primeiras idades (03 a 28 dias), com menores ganhos nas idades mais avançadas (28 a 91 dias). Isto significa dizer que o RSMG possivelmente não apresenta comportamento pozolânico.

O nível de resistência alcançado na idade de 03 dias para o CAA40, com cimento CP II-Z-32, é de 68,2 %, com relação a 28 dias de idade, considerado um ganho maior do que aquele obtido geralmente para concreto convencional com mesmo tipo de cimento, que está em torno de 58,0 % (NBR 6118/03). O mesmo comportamento ocorre com relação aos 07 dias de idade, de 85,0 %, comparado com os 78,0 % para concreto convencional (NBR 6118/03).

A Tabela 33 apresenta as relações f_{c7}/f_{c28} , de alguns trabalhos técnicos da literatura, já citados anteriormente no Capítulo 02, a fim de servir como comparativos, com o CAA42 de Lisboa (2004), o CAA40 e o C.C. produzidos neste trabalho.

Tabela 33 – Relações f_{c7}/f_{c28} , do CAA de outros autores, CAA40 e C.C., em c.p. 10 cm x 20 cm.

Idade (dias)	Relações f_{c7}/f_{c28} : CAA de outros autores, CAA40 e C.C.				
	FELEKOGLU	SONEBI et al.	CAA40	CAA42	C.C.
07	26,9	19,7	31,3	30,6	22,9
28	31,4	32,1	36,8	38,9	32,3
f_{c7}/f_{c28}	0,85	0,61	0,85	0,78	0,71

A partir da Tabela 33, é verificado que as relações f_{c7}/f_{c28} encontradas para os CAA da literatura, bem como o CAA40, são aproximadas daquela encontrada para concreto convencional, que é de 0,78, segundo a NBR 6118/03. Comparando o CAA40 com o CAA42, produzidos ambos com adição mineral do RSMG, é verificada grande aproximação, com variação de apenas de + 2,3 %, aos 07 dias, de - 5,7 %, aos 28 dias, e de + 7 % na relação f_{c7}/f_{c28} .

O CAA40 apresenta maiores valores para f_c nas primeiras idades, devido ao fato dos concretos auto-adensáveis produzidos por Felekoglu e Sonebi et al. (2003) terem sido produzidos com a adição da cinza volante, responsável pelo comportamento pozolânico da mistura.

A Figura 57 apresenta a curva de evolução da resistência à compressão de CAA com relação à idade de 28 dias, obtida a partir dos dados experimentais. Também uma relação entre a razão f_{cj}/f_{c28} e a idade de ensaio em dias é representada por uma função logarítmica entre os pontos obtidos, como está expresso na Equação 10, que descreve o comportamento das resistências à compressão, obtidas nas diferentes idades.

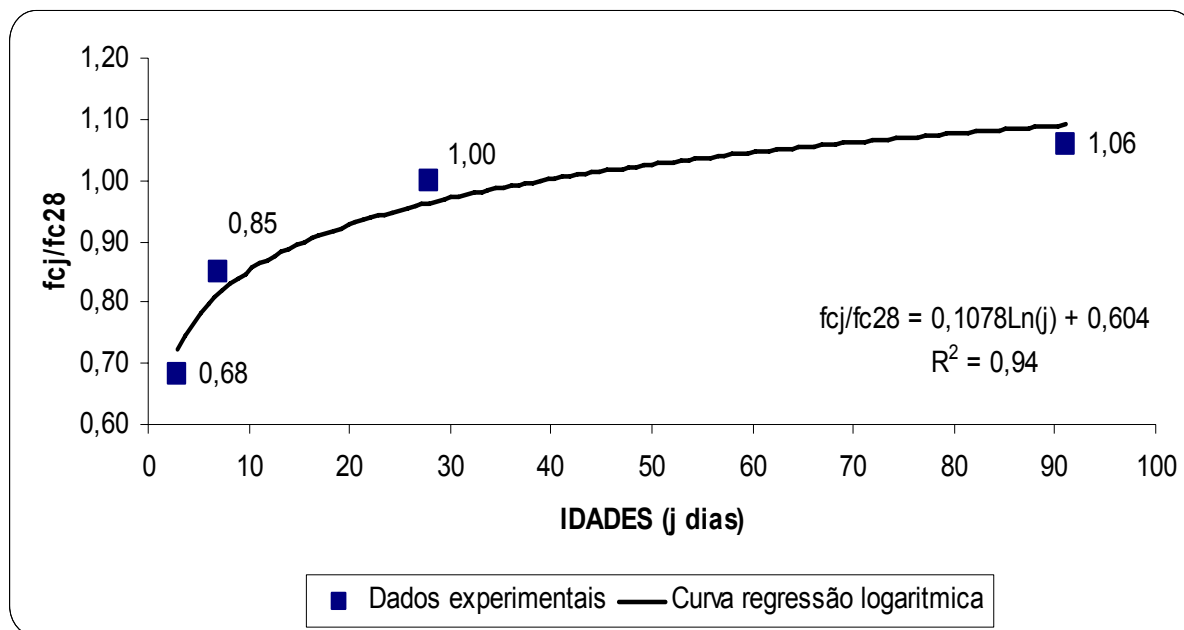


Figura 57 – Curva de evolução de resistência à compressão (relação f_{cj}/f_{c28} ao longo das idades).

$$\frac{f_{cj}}{f_{c28}} = 0,1078 \cdot \ln(j) + 0,604 \rightarrow R^2 = 0,94 \quad (10)$$

A fim de comparar o comportamento da evolução das resistências à compressão do CAA40, obtida no estudo e representada a partir da Equação 10, com os resultados das resistências à compressão apresentados por outros autores da literatura, com mesmo tipo de cimento (cimento Portland composto), a Figura 58 apresenta as curvas de evolução da resistência à compressão do CAA, com relação à idade de 28 dias, obtidas a partir: dos dados experimentais de outros autores da literatura (SONEBI, JAHROMI e BARTOS (2003); FELEKOGU (2003); CAA40; CAA42 e C.C.), e dos resultados experimentais.

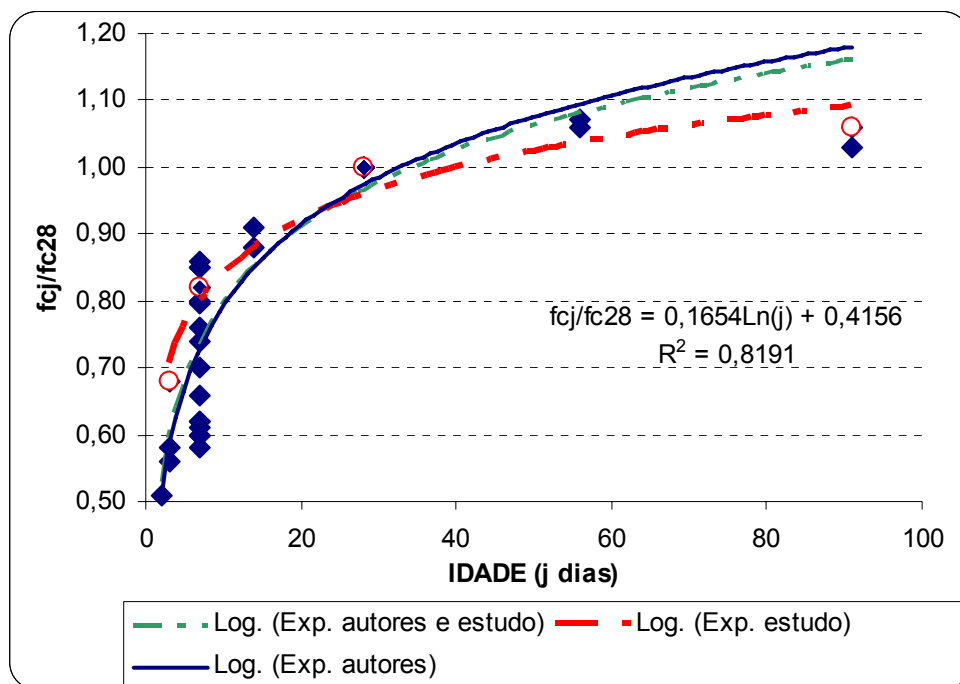


Figura 58 – Curvas de evolução do CAA com dados do estudo e de outros autores da literatura.

A Figura 58 mostra que as curvas de evolução do CAA ao longo das idades, para a curva obtida para CAA de outros autores e do CAA de outros autores e dados experimentais do CAA, simultaneamente, principalmente nas primeiras idades, até os 28 dias. A relação entre a razão f_{cj}/f_{c28} e a idade de ensaio, dos dados obtidos por outros autores e os obtidos no estudo, simultaneamente, são representadas por uma função logarítmica de ajuste, mostrada na Equação 11.

$$\frac{f_{cj}}{f_{c28}} = 0,1654 \cdot \ln(j) + 0,4156 \rightarrow R^2 = 0,82 \quad (11)$$

As equações que descrevem a evolução da resistência à compressão, para concretos convencionais, são geralmente encontradas em normas. Das equações encontradas na literatura, foi selecionada a de Helene (1993) e a do CEB-FIP (1990), de acordo com as Equações 12 e 13 que descrevem a evolução dos valores de resistências à compressão aos 28 dias em função de uma idade qualquer j (f_{cj}/f_{c28}).

$$\frac{f_{cj}}{f_{c28}} = \frac{1,45}{7,14^{1/\sqrt{j}}} \quad (\text{HELENE, 1993}). \quad (12)$$

$$\frac{f_{cj}}{f_{c28}} = \left\{ \exp \left\{ 0,25 \cdot \left[1 - \left(\frac{28}{j/1} \right)^{1/2} \right] \right\} \right\} \text{ (CEB-FIP, 1990).} \quad (13)$$

Na Figura 59, as curvas das relações f_{cj}/f_{c28} são determinadas usando as Equações 11, que descrevem a evolução dos valores de resistências à compressão aos 28 dias em função de uma idade qualquer j (f_{cj}/f_{c28}) para o CAA. As Equações 12 e 13 são aquelas propostas para concretos convencionais. Na figura é possível se fazer uma comparação entre os CAA e os concretos convencionais, para a relação f_{cj}/f_{c28} .

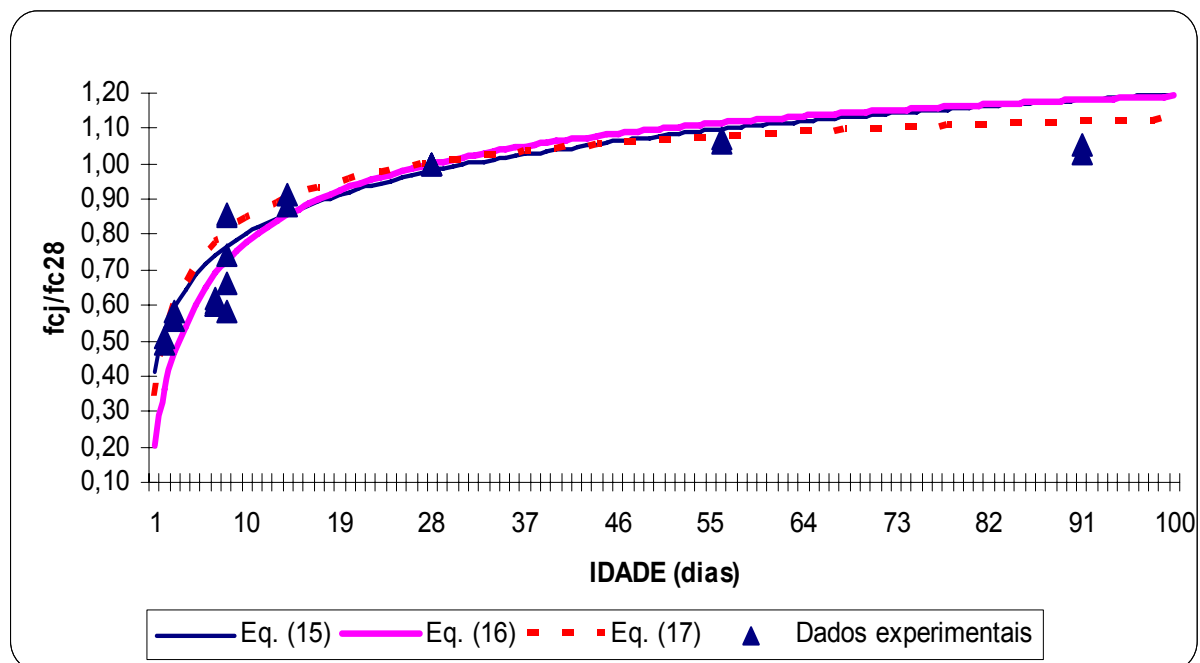


Figura 59 – Curvas de evolução de f_c .

A partir da Figura 59 é verificado que as curvas que descrevem a evolução da resistência à compressão de concretos convencionais se aproximam bastante da curva de evolução de f_c para o CAA40 e para o de outros autores.

• Resistência à tração (f_t)

Nos cálculos da resistência em elementos estruturais de concreto armado, a resistência à tração é normalmente desprezada, mas ela é usada na avaliação da resistência ao cisalhamento de elementos sem armadura transversal, da tensão de aderência e da carga de fissuração.

De acordo com os acréscimos de f_t ao longo das idades, pode-se constatar: de 03 aos 07 dias de idade, houve um ganho de 4 %, de 07 aos 28 dias de idade, houve um ganho de 61,5 % e de 28 aos 91 dias, houve um ganho de 4,7 %. As evoluções apresentadas para f_t mostram que o CAA apresentou uma grande variação de 07 aos 28 dias, e pequenas variações de 03 aos 07 dias, e de 28 aos 91 dias. Isto significa dizer que os resultados apresentaram algumas variações que necessitariam de estudos mais detalhados, com maior quantidade de amostras e análises estatísticas, para que tais resultados possam apresentar uma maior confiabilidade.

Os resultados obtidos para o CAA40, com relação a sua evolução ao longo das idades, são similares ao de Klug et al. (2003), que constata um maior crescimento de f_t com relação à f_c ao longo das idades. No entanto, existem poucas publicações sobre CAA que relatam tal fato.

A Figura 60 apresenta as relações f_{tj} / f_{cj} , aos 03, 07, 28 e 91 dias, para o CAA estudado.

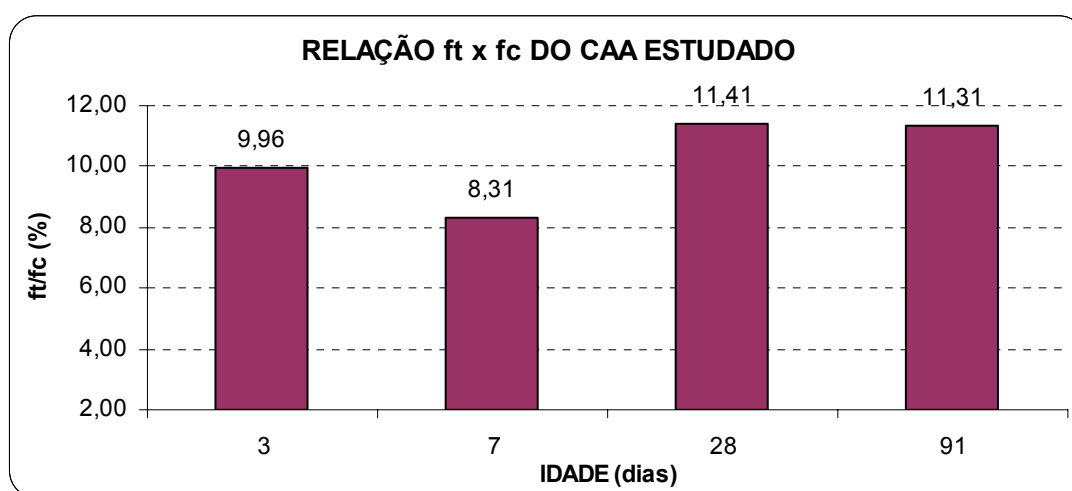


Figura 60 – Relação $f_t \times f_c$ para o CAA estudado, aos 03, 07, 28 e 91 dias.

A partir dos resultados apresentados na Figura 60, pode-se constatar uma variação de 8,31 % a 11,41 % nas relações $f_t \times f_c$, valores bem próximos quando comparados aos limites propostos para concretos convencionais, que é entre 10 % e 15 % (MEHTA E MONTEIRO, 1994).

A Equação 14 apresenta a relação entre f_c e f_{td} (Resistência à tração direta) da NBR 6118/03.

$$f_{td} = 0,3 f_c^{2/3}, \text{ para } 10,0 \text{ MPa} \leq f_c \leq 50,0 \text{ MPa} \text{ (NBR 6118/03)} \quad (14)$$

Segundo a norma, o valor de f_{td} , conhecido como resistência à tração direta, corresponde a 90% do valor de f_t (resistência à tração indireta). Os resultados experimentais são obtidos a partir do ensaio de tração indireta ou compressão diametral. No entanto, a fim de comparar os resultados experimentais com os obtidos na NBR, é necessário converter o valor encontrado de f_{td} para f_t , de acordo com a Tabela 34.

Tabela 34 – Comparativo dos valores de f_t para CAA40 e NBR 6118/03.

Valores de f_c e f_t – CAA40 e NBR 6118/03 - MPa			
f_t - CAA40	f_c - CAA40	f_{td} - NBR 6118/03	f_t - NBR 6118/03
2,5	25,1	2,6	2,9
2,6	31,3	3,0	3,3
4,2	36,8	3,3	3,7
4,4	38,9	3,4	3,8

A partir da Tabela 34, comparando os valores de f_t para o CAA40 com os da NBR 6118/03, para diferentes valores de resistência à compressão, é verificado: para f_c de 25,1 MPa, é verificada uma variação de -14,4 %, para f_c de 31,3 MPa, de - 26,9 %, para f_c de 36,8 MPa, de + 14,13 % e para f_c de 38,9 MPa, de +14,88 %. No entanto, embora os valores obtidos experimentalmente de f_t apresentassem comportamento similar aos obtidos por alguns trabalhos da literatura para CAA, com maiores ganhos de f_t com relação à f_c , nas idades mais avançadas, com relação à norma brasileira, os resultados apresentam variações consideradas, o que constata a necessidade de uma análise mais detalhada, com maior quantidade de amostras e análises estatísticas, para se justificar com mais clareza tais resultados.

• Módulo de deformação estático (E_c)

O módulo de deformação estático ou módulo de deformação longitudinal do concreto (E_c) é a propriedade necessária para avaliação das deformações e dos deslocamentos dos elementos estruturais feitos com este material. Está diretamente relacionado com as propriedades e percentagem volumétrica da pasta de cimento e dos agregados, e características da zona de transição e também do método de determinação de E_c .

A partir dos resultados apresentados de E_c , para o CAA estudado, pode-se constatar um aumento nos valores médios de E_c de 11,40 %, de 03 aos 07 dias, 15,87 %, de 07 aos 28 dias e 1,43 %, de 28 aos 91 dias. Já para os valores médios de f_c : de 24,7 %, de 03 aos 07 dias, de 17,57 %, de 07 aos 28 dias e 5,7 %, de 28 aos 91 dias. Os resultados constataam que as evoluções ocorreram de forma semelhante para E_c e f_c , ou seja, as maiores variações nas primeiras idades, até os 28 dias e uma pequena evolução de 28 a 91 dias.

Com o objetivo de se obter uma curva que represente uma relação entre f_c e E_c , para CAA, são utilizados os valores obtidos experimentalmente e de vários autores, conforme Figura 61. A equação que expressa a curva obtida é mostrada na Equação 15.

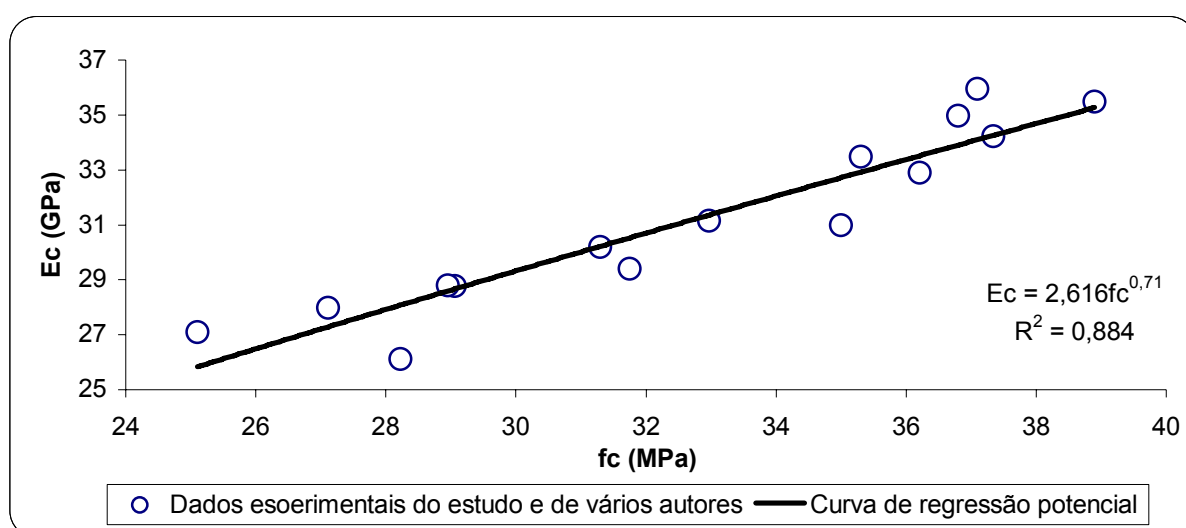


Figura 61 – Curva de ajuste exponencial da relação experimental entre $E_c \times f_c$ para CAA, com dados experimentais do estudo e de vários autores da literatura.

$$E_c = 2616 \cdot f_c^{0,71} \quad (15)$$

Para os estatísticos, coeficientes de correlação (R^2) acima de 0,9, podem ser considerados satisfatórios quando tratam de propriedades de concretos e argamassas. Segundo Shilstone (1998), concretos e argamassas são materiais tão heterogêneos que um coeficiente de correlação acima de 0,6 pode ser considerado significativo. Com relação ao gráfico da Figura 61, é verificado que as relações entre E_c e f_c encontradas experimentalmente (CAA40) estão próximas às encontradas por autores da literatura. (PERSSON, 2000; KONIG et al., 2001; KLUG, 2003; LISBOA, 2004; MELO, 2005).

Na Figura 62, são mostradas as curvas que relacionam f_c e E_c , de acordo com as seguintes equações: a equação obtida experimentalmente, Equação 15; as propostas na NBR 6118/03, Equação 16; a do ACI 318-02, Equação 17 e a de Carrasquillo et al. (1981), Equação 18.

$$E_c = 5600 f_c^{1/2}, \text{ para } 10,0 \text{ MPa} \leq f_c \leq 50,0 \text{ MPa (NBR 6118/03)} \quad (16)$$

$$E_c = 4730 f_c^{0,5}, \text{ para } 21,0 \text{ MPa} \leq f_c \leq 89,0 \text{ MPa (ACI 318-02)} \quad (17)$$

$$E_c = 3320 f_c^{0,5} + 6900, \text{ para } 21,0 \text{ MPa} \leq f_c \leq 89,0 \text{ MPa (CARRASQUILLO et al., 1981)} \quad (18)$$

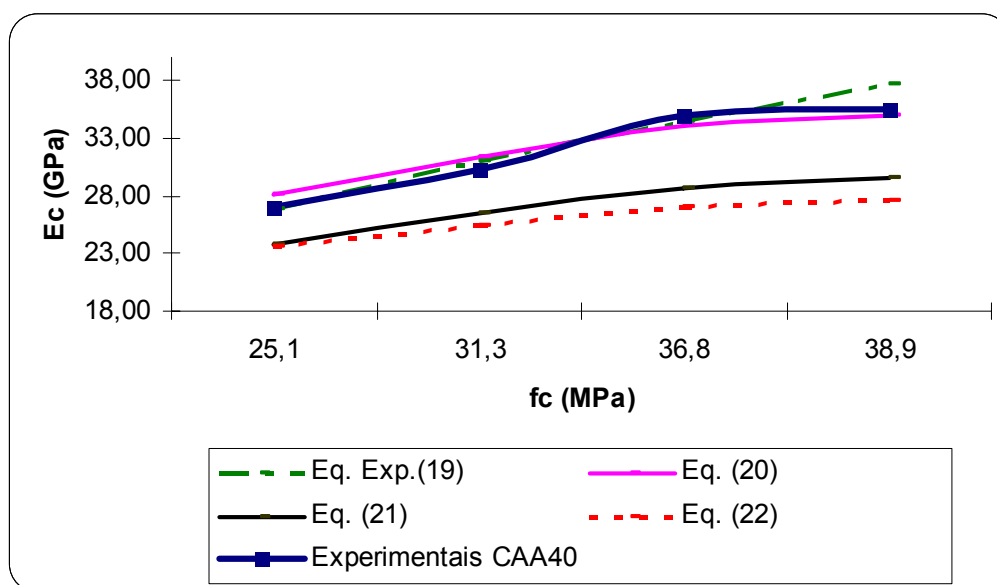


Figura 62 – Relação E_c x f_c experimentais (CAA) e propostas na literatura.

De acordo com a Figura 62, é verificado que a equação experimental obtida a partir do CAA40 e de autores da literatura, Equação 15, apresenta as relações entre E_c e f_c bastante próximas da apresentada na NBR 6118/03 (Equação 16). Já com relação às Equações 17 e 18, do ACI 318-02 e de Carrasquillo et al. (1981), a equação experimental não apresenta tanta similaridade.

A Tabela 35 apresenta um comparativo dos resultados obtidos experimentalmente e da NBR 6118/03 para E_c .

Tabela 35 - Comparativos de E_c do CAA40 e da NBR 6118/03, para diferentes resistências.

Valores de f_c (MPa) e E_c (GPa) – CAA40 e NBR6118/03		
f_c – CAA40	E_c - CAA40	E_c - NBR 6118/03
25,1	27,1	28,0
31,3	30,2	31,3
36,8	35,0	34,0
38,9	35,5	34,9

A partir da Tabela 35, comparando os valores de E_c para o CAA40 com os da NBR 6118/03, para diferentes valores de resistência à compressão, é verificado: para f_c de 25,1 MPa, é verificada uma variação de - 3,3 %, para f_c de 31,3 MPa, de - 3,6 %, para f_c de 36,8 MPa, de + 2,9 % e para f_c de 38,9 MPa, de + 1,7 %. Tal variação é considerada desprezível dentro dos limites estatísticos propostos na literatura.

Os ganhos no módulo de deformação longitudinal, ao longo das idades são: de 03 à 07 dias , de 11,4 % para o CAA40 e 11,65 % para a NBR 6118/03, e de 07 à 28 dias, de 15,86 % para o CAA40 e 8,46 % para a NBR 6118/03. De 28 a 91 dias houve um acréscimo pequeno, de 1,42 % para o CAA40 e 2,82 % para a NBR 6118/03. Isto significa que a equação da norma brasileira para a determinação de E_c a partir de f_c atende ao CAA.

Considerações finais e sugestões

Após a apresentação dos resultados e das análises neste trabalho, as considerações finais observadas foram as seguintes:

É verificado que a redução na dimensão máxima característica das partículas do aditivo mineral modifica de forma considerável as propriedades do CAA, principalmente no estado fresco. A redução granulométrica, na composição do CAA, teve como conseqüências: aumento da dosagem ótima do superplastificante e redução do volume de pasta.

O uso de finos passante na peneira com malha de abertura de 300 μm melhorou as propriedades de auto-adensabilidade do CAA obtido, com relação às propriedades alcançadas no CAA com finos passante na peneira de 600 μm , principalmente com relação à coesão da mistura.

A auto-adensabilidade do CAA produzido atendeu aos requisitos estabelecidos na literatura técnica para o atendimento de um concreto auto-adensável, como: fluidez, capacidade de preenchimento e de passagem entre os obstáculos, com ausência de exsudação e/ou segregação.

No estudo de verificação da auto-adensabilidade do CAA, com CAA vibrado e não vibrado, é verificado que a vibração no concreto não melhorou a distribuição dos poros no concreto, tanto na superfície do c.p., quanto na seção de ruptura por compressão diametral. Os resultados de f_t e f_c não sofreram melhoras na vibração do concreto. Isto constata que o CAA atendeu aos requisitos de compactação e adensamento necessários.

Um estudo de procedimento de moldagem em c.p. também foi realizado para CAA. Os resultados das resistências não revelaram diferenças significativas para c.p. cilíndricos de 10 cm x 20 cm, em contrapartida, para c.p. cilíndricos de 15 cm x 30 cm, o tipo de procedimento influenciou no resultado da resistência á compressão. Tais resultados comprovaram que a forma de colocação do CAA em c.p. de 10 cm x 20 cm e 15 cm x 30 cm não diferem daqueles exigidos na NBR 5738/03, isto é, uma camada para c.p. de 10 cm x 20 cm e duas camadas para c.p. de 15 cm x 30 cm.

Com relação aos resultados de f_c :

- a) O CAA com RSMG # 300 μm , embora com menor volume de pasta, para uma mesma relação a/c, teve comportamento similar ao CAA com RSMG # 600 μm .
- b) O CAA com RSMG # 300 μm apresenta valores de f_c significativamente maiores que os encontrados para concreto convencional
- c) Os valores de f_c para o CAA estudado, bem como suas evoluções, se enquadram nos resultados apresentados de CAA para vários autores da literatura.
- d) A relação obtida para CAA de f_c entre c.p. de 15 cm x 30 cm e 10 cm x 20 cm se enquadra naquelas apresentadas na literatura para concreto convencional.
- e) A relação obtida para CAA estudado entre f_{ci}/f_{c28} , é atendida quando comparada aos vários autores da literatura técnica, bem como às relações propostas para concretos convencionais.

Com relação aos resultados de f_t :

- a) Os valores de f_t , bem como suas evoluções ao longo das idades, se comportaram bem diferentes daqueles obtidos para f_c , principalmente nas idades mais avançadas, embora alguns trabalhos da literatura apresentem o mesmo comportamento. No entanto, são aconselhados estudos mais detalhados para explicar tal fato, com resultados estatísticos e grandes amostras de c.p.
- b) A relação obtida para CAA estudado entre f_t e f_c se encontra no intervalo proposta para concreto convencional, que é de 0,1 a 0,15.
- c) Os valores obtidos para f_t apresentaram comportamento diferenciado quanto comparado à NBR 6118/03.

Com relação aos resultados de E_c :

- a) O CAA com RSMG # 300 μm apresentou comportamento similar aos CAA apresentados na literatura.
- b) Os resultados apresentados para o CAA se enquadram nos limites apresentados na literatura, que são de 14×10^3 MPa a 40×10^3 MPa (MEHTA e MONTEIRO, 1994).
- c) A evolução de E_c com as idades para o CAA se apresentou de forma semelhante a evolução de f_c , ou seja, as maiores variações nas primeiras idades, até os 28 dias e uma pequena evolução de 28 a 91 dias.
- d) O comportamento da curva que relaciona $f_c \times E_c$, para CAA, se apresentou de forma bastante similar àquela obtida a partir da relação obtida na NBR 6118/03.

Desta forma apresentam-se sugestões para futuros trabalhos:

- Estudar a perda das propriedades de auto-adensabilidade do CAA ao longo do tempo;
- Determinar propriedades reológicas em pastas, argamassas e concretos em equipamentos mais sofisticados e mais precisos, como por exemplo: o viscosímetro e o reômetro.
- Estudar o comportamento do CAA, trabalhando com relações água/cimento de 0,30 a 0,50; fazendo variar também as massas de cimento e RSMG, obtendo curvas de resistência desse concreto em função desses parâmetros.
- Aplicar as dosagens de CAA encontradas neste trabalho em peças pré-fabricadas, fazendo um estudo de custos reais e comparando com a fabricação das mesmas peças em concreto convencional de mesma resistência.
- Realizar estudos comparativos de permeabilidade ao ar no CAA e em concretos convencionais, para estudos de durabilidade.
- Fazer um estudo mais aprofundado da resistência à tração (f_t) para o CAA, a fim de justificar o comportamento diferenciado, com relação aos concretos convencionais.

Referências Bibliográficas

AMERICAN CONCRETE INSTITUTE (ACI). **Building Code Requirements For Reinforced Concrete**. ACI 318-02, and Commentary ACI 318R – 02, 2002.

ASSAD, J.; KHAYAT, K.H.; MESHAB, H. **Assessment of thixotropy of flowable and self-consolidating concrete**. ACI Materials Journal, v.100, n.2, mar/april 2003, p.99-107.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **Concreto – Procedimento para moldagem e cura de corpos-de-prova**. NBR 5738, Rio de Janeiro, 2003.

_____. **NBR 5739**: Concreto. Ensaio de compressão em corpos-de-prova cilíndricos. Rio de Janeiro, 1994.

_____. **NBR 6118**: Projeto de Estruturas de Concreto - Procedimento, Rio de Janeiro, ABNT, 2004.

_____. **NBR 6508**: Grãos de solos que passam na peneira de 4,8mm. Determinação da massa específica. Rio de Janeiro, 1984.

_____. **NBR 7211**: Percentagem de massa de materiais pulverulentos nos agregados. Rio de Janeiro, 1983.

_____. **NBR 7221**: Agregados. Ensaio de qualidade de agregado miúdo. Rio de Janeiro, 1987.

_____. **NBR 7222**: Argamassa e concreto. Determinação da resistência à tração por compressão diametral de corpos-de-prova cilíndricos. Rio de Janeiro, 1994.

_____. **NBR 7223**: Consistência do concreto pelo abatimento do tronco de cone. Rio de Janeiro, 1992.

_____. **NBR 7809**: Agregado graúdo. Determinação do índice de forma pelo método do paquímetro. Rio de Janeiro, 1983.

_____. **NBR 8522**: Concreto. Determinação do módulo de deformação estática e diagrama tensão-deformação. Rio de Janeiro, 1984.

_____. **NBR 9776**: Agregados. Determinação da massa específica de agregados miúdos por meio do frasco de Chapman. Rio de Janeiro, 1987.

_____. **NBR 9778:** Argamassa e Concreto endurecidos - Determinação da absorção de água por imersão - Índice de vazios e massa específica. Rio de Janeiro, ABNT, 1987.

_____. **NBR 10004:** Resíduos sólidos. Classificação. Rio de Janeiro, 1987.

_____. **NBR 11578:** Cimento Portland composto. Especificação. Rio de Janeiro, 1991.

_____. **NBR NM 67:** Concreto. Determinação da consistência pelo abatimento do tronco de cone, 1998.

_____. **NBR NM 76:** Cimento Portland – Determinação da finura pelo método de permeabilidade ao ar (Método de Blaine). Rio de Janeiro, 1998.

_____. **NBR NM 248:** Agregados. Determinação da composição granulométrica, 2001.

ASTM C29/C29M (1992). Standard. **Test Method for unit weight and voids in aggregate.**

ASTM C939 (1987). Standard. **Test Method for flow of Grout for Preplaced-Aggregate Concrete (Flow Cone Method).**

BAALBAKI, W.; BAALBAKI, AITCIN, P.C. **La Mesure Pratique de la Résistance a lá Compression des Bétons.** Materials & Structures, 1993, p.13.

BARTOS, P. J. M.; SONEBI M.; ZHU W.; GIBBS J.; TAMIMI A.. **Properties of Hardened Concrete.** Final report. University of Paisley. Scotland, United Kingdom. 2000.

BILLBERG, P. **Self-Compacting Concrete for Civil Engineering Structures – The Swedish Experience.** In: S. C. C. R. I. 1-77. Stockholm, 1999.

BUI, V. K.; AKKAYA, Y; SHAH, S. **Rheological model for self-consolidating concrete.** ACI Materials Journal, v.99, n.6, nov./dec.2002, p.549-559.

CAMARGOS, U. A. **Concreto Auto-Adensável e Autonivelante.** Técnica, São Paulo, n. 59, 2002, p. 04-05, fevereiro.

CAMPION, M. J.; JOST, P. **Self-Compacting Concrete, Expanding the Possibilities of Concrete Design and Placement.** Concrete International, v. 22, n.4, 2000, p. 31-34.

CARRASQUILLO, L. R.; NILSON, A. H.; SLATE, F. O.. **Properties of High Strength Concrete Subject to Short-Term Loads.** ACI JOURNAL, vol. 78, no. 3, p. 171-178, 1981.

CHEN,Y.Y.; TSAI C.T.; HWANG, C.L. **The study on mixture proportion of gap-gradation on aggregate for SCC.** O. Wallevik and I, Nielsson. In: INTERNATIONAL RILEM SYMPOSIUM ON SELF-COMPACTING CONCRETE, 3st, 2003, Reykjavik. **Proceedings...** France: RILEM Publications, 2003, p.533-539.

COMITÉ EURO-INTERNATIONAL DU BÉTON. **CEB-FIP Model Code 1990.** London, Thomas Telford, 1993.

DOMONE, P. L.; JIN, J. **Properties of Mortar for Self-Compacting Concrete.** Edição: A. Skarendhal; Petersson. In: INTERNATIONAL RILEM SYMPOSIUM ON SELF-COMPACTING CONCRETE, 1st, 1999, Stockholm. **Proceedings...** France: RILEM Publications, 1999, p.109-120.

EDAMATSU, H.; NISHIDA, N.; OUCHI, M. (1999) **A Rational Mix-Design Method for Self-Compacting Concrete Considering Interaction Between Coarse Aggregate and Mortar Particles.** In: 1st International Rilem Symposium on Self-Compacting Concrete, p. 309-320, 1999, Stockolm, Sweden. A. Skarendahl and Ö. Petersson (editores) , E & FN Spon.

EFNARC. **Specificalion and Guidelines for Self-Compacting Concrete.** EFNARC, 2002.

EMBORG, M. **Mixing and transport.** SCC Final Report – Task 8.1, Brite EuRam: 2000. p.64.

ESPING, O. **Methods for characterization of fillers and fines for self-compacting concrete.** O. Wallevik and I, Nielsson. In: INTERNATIONAL RILEM SYMPOSIUM ON SELF-COMPACTING CONCRETE, 3st, 2003, Reykjavik. **Proceedings...** France: RILEM Publications, 2003, p.208-219.

FELEKOGLU, B. **A comparative study o the use of mineral abd chemical types of viscosity enhancers in self-compacting concrete.** Edição: O. Wallevik and I, Nielsson. In: INTERNATIONAL RILEM SYMPOSIUM ON SELF-COMPACTING CONCRETE, 3st, 2003, Reykjavik. **Proceedings...** France: RILEM Publications, p.446-455, 2003.

FILHO, C. D.; RODRIGUES, E. **Quadro setorial brasileiro das rochas ornamentais e de revestimento de mármore e granitos.** Rochas de Qualidade, v. 27, n. 147, 1999, p. 86-104.

GOMES, P. C. C. **Estudo de Parâmetros que Influenciam a Produção e as Propriedades dos Concretos de Alta Resistência.** Dissertação – Universidade Federal do Rio de Janeiro, COPPE, Rio de Janeiro/RJ, 1995.

GOMES, P.C.C. **Optimization and characterization of high-strength self-compacting concrete.** 2002. 139p. Tese - Escola Técnica Superior D'Enginyers de Camins, Universitat Politècnica de Catalunya, Catalúnya, 2002.

HELENE, P. **Proposta apresentada em reunião da comissão de revisão da NBR 6118**. 2 p, 1993.

HELENE, P; TERZIAN, P. **Manual de dosagem e controle do concreto**. 1. ED. SÃO PAULO: PINI; BRASÍLIA: SENAI, 1993, P.349.

INFORMATIVO TÉCNICO. **Tecnologia do concreto armado**. ABESC – IBRACON - IBTS, ano 8, n.23, dez 2005, p.12.

JAHROMI, A.B.; BARTOS, P.J.M.; SONEBI, M. **Development and optimisation of médium strength self-compacting concrete by using pulverised fly ash**. Edição: O. Wallevik and I, Nielsson. In: INTERNATIONAL RILEM SYMPOSIUM ON SELF-COMPACTING CONCRETE, 3st, 2003, Reykjavik. **Proceedings...** France: RILEM Publications, p.514-524, 2003.

JARAMILLO, C.A.A. et al. **Reduced of self-consolidating concrete made with various admixture combinations**. Edição: O. Wallevik and I, Nielsson. In: INTERNATIONAL RILEM SYMPOSIUM ON SELF-COMPACTING CONCRETE, 3st, 2003, Reykjavik. **Proceedings...** France: RILEM Publications, 2003, p.240-250.

JUVAS, K. Self-compacting concrete – developments in the precast industry. **Concrete Precasting Plant and Technology**, v.70, n.8, 2004, p.42-52.

KANTRO, D. L. **Influence of Water Reducing Admixtures on Properties of Cement Pastes** – A miniature slump test. Cement Concrete Aggregates, v. 2, 1980, p. 95-102.

KHAYAT, K.H. **Optimization and performance of air-entrained, self-consolidating concrete**. ACI Materials Journal, v.97, n.5, sept/oct. 2000, p.526-535..

KHAYAT, K. H. **Workability, Testing, and Performance of Self-Consolidating**. ACI Materials Journal, v. 94, n. 4, 1999, p. 346-353.

KHAYAT, K.H; HU, C.; MONTY, H. **Stability of self-consolidating concrete, advantages, and potencial applications**. Edição: A. Skarendhal; Petersson. In: INTERNATIONAL RILEM SYMPOSIUM ON SELF-COMPACTING CONCRETE, 1st, 1999, Stockholm. **Proceedings...** France: RILEM Publications, 1999, p.143-152.

KHAYAT, K.H.; MORIN, R. **Performance of self-consolidating concrete used to repair parapet wall in montreal**. Edição: O. Wallevik and I, Nielsson. In: INTERNATIONAL RILEM SYMPOSIUM ON SELF-COMPACTING CONCRETE, 3st, 2003, Reykjavik. **Proceedings...** France: RILEM Publications, 2003, p.913-919.

KLUG, Y; HOLSCHEMACHER. **Comparison of the hardened properties of self-compacting and normal vibrated**. Edição: O. Wallevik and I, Nielsson. In: INTERNATIONAL RILEM SYMPOSIUM ON SELF-COMPACTING CONCRETE, 3st, 2003, Reykjavik. **Proceedings...** France: RILEM Publications, 2003, p.596-605.

KUBO, M.; NAKANO, M.; AOKI, H., SUGANO, S. and OUCHI, M. **The quality control method of self-compacting concrete using testing apparatus for self-compactability evaluation.** Proc. Second International Symposium on Self-Compacting Concrete, Ozawa, K. and Ouchi, M. (editors), COMS Engineering Corporation, Tokyo, Japan, 2001, p.555-564.

LESSARD, F.; BOULAY, C.; ROSSI, P. **Testing High Performance Concrete.** **High Performance Concrete – From Material to Structure.** Yves Malier, London, 1992, p. 196-213.

LISBOA, E.M. **Obtenção do concreto auto-adensável utilizando o resíduo de serragem de mármore e granito e estudo de propriedades mecânicas.** 2004. p1-115. Dissertação – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal de Alagoas, Alagoas, 2004.

MALHOTRA, V.M. **Are 4 x 8 Inch Concrete Cylinders as Good as 6 x 12 Inch Cylinders for Quality Control of Concrete?.** ACI Journal, jan/1976, v.73, nº 1, p.33-36.

MARTINS, V.C. **Otimização dos processos de dosagem e proporcionamento do concreto dosado em central com a utilização de aditivos: estudo de caso.** 2005. p1-186. Dissertação – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2005.

MCLEISH, A. **Flowable concrete for structural repairs.** In: International Rilem conference on production methods and workability of concrete. P.J.M. Bartos, D.L. Marrs and D.J. Cleand (editores), E & fn Spon, 1996, p.515-522.

MEHTA, P.K.; MONTEIRO, P.J.M. **Concreto: estrutura, propriedades e materiais.** 1.ed. São Paulo: PINI, 1994, pg.573.

MEHTA.P.K.; MALHOTRA, V.M. **Pozzolanic and cimentitious materials.** Ottawa: CANMET, 1987, p.428.

MOURA, W.A.; GONÇALVES, J.P.; LEITE, R.S. **Utilização do resíduo de corte de mármore e granito em argamassas e revestimento e confecção de lajotas para piso.** Sitientibus, Feira de Santana, n.26, jan/jun 2002, p.49-61.

NEVES, G. de A. **Reciclagem de Resíduos da Serragem de Granitos para uso como Matéria-Prima Cerâmica.** Tese – Curso de Pós-Graduação em Engenharia de Processos. Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, 2002.

NEVILLE, A. M. **Propriedades do concreto.** São Paulo: Pini, 1997.

NUNES, S.C.B. **Betão Auto-Compactível: Tecnologia e Propriedades.** Pós-Graduação em Estruturas de Engenharia Civil – Faculdade de Engenharia, Universidade do Porto, Porto. 2001, p.198.

OKAMURA, H.; OUCHI, M. **Self-compacting concrete. Development, present use and future.** Edição: A. Skarendhal; Petersson. In: INTERNATIONAL RILEM SYMPOSIUM ON SELF-COMPACTING CONCRETE, 1st, 1999, Stockholm. **Proceedings...** France: RILEM Publications, 1999, p.3-14.

OKAMURA, H. **Self-Compacting High-Performance Concrete.** International Concrete, v. 19, n. 7, 1997, p. 50-54.

OUCHI, M; EDAMATSU, Y. **A simple evaluation method for interaction between coarse aggregate and mortar particles in the self-compacting concrete.** A. Skarendhal; Petersson. In: INTERNATIONAL RILEM SYMPOSIUM ON SELF-COMPACTING CONCRETE, 1st, 1999, Stockholm. **Proceedings...** France: RILEM Publications, 1999, p.121-130.

PARIS, M.; TAVANO, S.; ALBIERO, E. **Self-compacting concrete (SCC): the construction of the base for the mill of the unimed cement plant of barletta (ITALY).** Edição: O. Wallevik and I, Nielsson. In: INTERNATIONAL RILEM SYMPOSIUM ON SELF-COMPACTING CONCRETE, 3st, 2003, Reykjavik. **Proceedings...** France: RILEM Publications, 2003, p.1017-1024.

PETERSSON, Ö. **Design of Self-Compacting Concrete, Properties of the Fresh Concrete.** In: **Proceedings...** Seminar on Self-Compacting Concrete, p.15-20. Malmö/Copenhagen, 2000.

RAVINDRARAJAH, R.S.; SILADYI, D.; ADAMOPOUBOS, B. **Development of high-strength self-compacting concrete with reduced segregation potencial.** Edição: O. Wallevik and I, Nielsson. In: INTERNATIONAL RILEM SYMPOSIUM ON SELF-COMPACTING CONCRETE, 3st, 2003, Reykjavik. **Proceedings...** France: RILEM Publications, p.530-539, 2003.

RONCERO, J. **Effect of superplasticizers on the behavior of concrete in the fresh and hardened states: Implications for high performance concretes.** 2000, 189.p. Tese – Escola Técnica Superior D'Enginyers de Camins, Universitat Politècnica de Catalunya, Catalunya, 2002.

ROONEY, M. J. **Assessment of the Properties of Fresh Self-Compacting Concrete with Reference to Aggregate Segregation.** Tese - University of Paisley/USA, 2002.

SAAK, W. A.; JENNINGS, H. M.; SHAH, S. P. **New Methodology for Designing Self-Compacting Concrete,** ACI Materials Journal, v. 94, n.6, 2001, p. 429-439.

SAKATA K.; AYANO T.; OGAWA A.. **Mixture Proportioning for Highly-Flowable Concrete Incorporating Limestone Powder.** **Proceedings...**Fifth International Conference on Fly Ash, Silica Fume, Slag and Natural Pozzolans in Concrete. ACI Proceedings. Milwaukee, Wisconsin. 1995.

SCIARAFFIA, R. **SCC application in a tunnel lining (CHILE).** Edição: O. Wallevik and I, Nielsson. In: INTERNATIONAL RILEM SYMPOSIUM ON SELF-

COMPACTING CONCRETE, 3st, 2003, Reykjavik. **Proceedings...** France: RILEM Publications, 2003, p.986-994.

SEDRAN, T. and DE LARRARD, F. **Optimization of self-compacting concrete thanks to packing model**. Edição: A. Skarendhal; Petersson. In: INTERNATIONAL RILEM SYMPOSIUM ON SELF-COMPACTING CONCRETE, 1st, 1999, Stockholm. **Proceedings...** France: RILEM Publications, 1999, p.321-332.

SHILSTONE, J.M. **Interpreting the Slump Test**. Concrete International, v.10, n.11, p.68-70, nov.1988.

SENAI – Serviço Nacional de Aprendizagem Industrial. Departamento Regional do Espírito Santo. **Processo de produção em serrarias de mármore e granito**. Rocha de Qualidade, v. 25,n. 112, 1993, p. 118-122.

SILVA, S. A. Caracterização do resíduo da serragem de blocos de granitos. **Estudo do potencial de aplicação na fabricação de argamassas de assentamento e de tijolos de solo-cimento**. Dissertação - Universidade Federal do Espírito Santo, Vitória/ES.1998.

SKARENDAHL, A; PETERSSON, Ö. **Self-compacting concrete State-of-the-Art**. In: Report of RILEM Tecnical Committee 174-SCC Self-Compacting Concrete. RILEM Publications, 2000.

SKARENDAHL, A. **The present – the future**. Edição: O. Wallevik and I, Nielsson. In: INTERNATIONAL RILEM SYMPOSIUM ON SELF-COMPACTING CONCRETE, 3st, 2003, Reykjavik. **Proceedings...** France: RILEM Publications, 2003, p.6-14.

SLATE, F.O.; NILSON, A.H; MARTINEZ, S. **Mechanical Properties of High-Strenght Lightweight Concrete**. ACI Journal, 1986, jul/aug, p.606-612.

TAKEUCHI, H.; HIGUCHI, M.; NANNI, A. **Application of Flowable Concrete in a Tunnel Lining**. Concrete International, v.16, n. 4, 1994, p.26-29..

TORALLES-CARBONARI, B. M.; GETTU, R.; AGULLÓ, A.; ACEÑA, V. (1999) **A Synthetic Approach for the Experimental Optimization of High Strength Concrete**. 4th International Symposium on Utilization of High Strength/Higt Performance Concrete, 1996, p. 161-167, Paris. F. De Larrard and R. Lacroix, Laboratoire Central des Ponts e Chaussées (editores).

TRAGARDH, J. **Microstructural features and related properties of self-compacting**. Edição: A. Skarendhal; Petersson. In: INTERNATIONAL RILEM SYMPOSIUM ON SELF-COMPACTING CONCRETE, 1st, 1999, Stockholm. **Proceedings...** France: RILEM Publications, 1999, p.175-185.

TUTIKIAN, B. F.; MOLIN, D. C. C. D.; CREMONINI, R. A.; KUHN, R. O.; BRESCOVIT, S. J. **Comparação da curva de dosagem, resistência à tração, consumo de materiais e custo dos concretos auto-adensáveis com metacaulim**

e fíler calcário. In: 46° Congresso Brasileiro do Concreto, II 431-II 442, 2004. Florianópolis. CD-ROM, Florianópolis: IBRACON, 2004.

TVIKSTA, L.-G. H. **Quality control.** SCC Final Report – Task 8.4. Brite EuRam: 2000. p.28.

WALRAVEN, J. **Structural aspects of self-compacting concrete.** Edição: O.Wallewick; I. Nielsson. In: INTERNATIONAL RILEM SIMPOSIUM ON SELF-COMPACTING CONCRETE, 3rd., 2003, Reykjavik. **Proceedings...**France: RILEM Publications, p.15-22, 2003.

WESTERHOLM, M.; LAGERBLAD, B. **Influence of fines from crushed aggregate on micro-mortar rheology.** Edição: O. Wallevik and I, Nielsson. In: INTERNATIONAL RILEM SYMPOSIUM ON SELF-COMPACTING CONCRETE, 3st, 2003, Reykjavik. **Proceedings...** France: RILEM Publications, p.165-173, 2003.