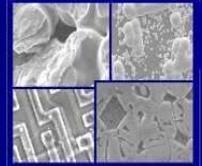




PUCRS

PONTIFÍCIA UNIVERSIDADE CATÓLICA DO RIO GRANDE DO SUL
PRÓ-REITORIA DE PESQUISA E PÓS-GRADUAÇÃO
**PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA E
TECNOLOGIA DE MATERIAIS**

Faculdade de Engenharia
Faculdade de Física
Faculdade de Química



PGETEMA

ESTUDO COMPARATIVO ENTRE MÉTODOS DE DOSAGEM DE CONCRETO AUTOADENSÁVEL

RAFAEL GÓMEZ FOCHS
ENGENHEIRO CIVIL

**DISSERTAÇÃO PARA A OBTENÇÃO DO TÍTULO DE MESTRE EM ENGENHARIA
E TECNOLOGIA DE MATERIAIS**

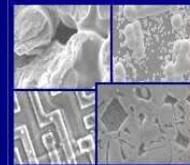
Porto Alegre
Agosto, 2011



PUCRS

PONTIFÍCIA UNIVERSIDADE CATÓLICA DO RIO GRANDE DO SUL
PRÓ-REITORIA DE PESQUISA E PÓS-GRADUAÇÃO
**PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA E
TECNOLOGIA DE MATERIAIS**

Faculdade de Engenharia
Faculdade de Física
Faculdade de Química



PGETEMA

ESTUDO COMPARATIVO ENTRE MÉTODOS DE DOSAGEM DE CONCRETO AUTOADENSÁVEL

RAFAEL GÓMEZ FOCHS

ENGENHEIRO CIVIL

ORIENTADOR: PROF. DR. ISAAC NEWTON DA SILVA

Dissertação realizada no Programa de Pós-Graduação em Engenharia e Tecnologia de Materiais (PGETEMA) da Pontifícia Universidade Católica do Rio Grande do Sul, como parte dos requisitos para a obtenção do título de Mestre em Engenharia e Tecnologia de Materiais.

**Porto Alegre
Agosto, 2011**

ESTUDO COMPARATIVO ENTRE MÉTODOS DE DOSAGEM DE CONCRETO AUTOADENSÁVEL

CANDIDATO: RAFAEL GÓMEZ FOCHS

Esta dissertação foi julgada para obtenção do título de *MESTRE EM ENGENHARIA E TECNOLOGIA DE MATERIAIS* e aprovada em sua forma final pelo Programa de Pós - Graduação em Engenharia da Pontifícia Universidade Católica do Rio Grande do Sul.



DR. ISAAC NEWTON LIMA DA SILVA – ORIENTADOR – PUCRS

BANCA EXAMINADORA



DRA. DENISE CARPENA COITINHO DAL MOLIN - UFRGS



DRA. ELEANI MARIA DA COSTA – PGETEMA/PUCRS

DEDICATÓRIA

À minha esposa, Naiara Battaglion Fochs, por toda a compreensão e apoio desde o início de nossa jornada.

AGRADECIMENTOS

Ao professor Isaac Silva, por viabilizar a realização deste trabalho no Programa de Pós-Graduação em Engenharia e Tecnologia de Materiais (PGETEMA), buscando apoio técnico e infraestrutura dentro da PUCRS.

Ao professor Fernando Antonio Piazza Recena, por aceitar participar e direcionar todo trabalho, compartilhando seu vasto conhecimento em tecnologia de concreto. Sem a sua participação o trabalho seria um desafio quase impossível. Obrigado também pelos seus valiosos conselhos que estão norteando minha vida profissional.

Ao técnico de laboratório José Eduardo Reinhardt da Cruz, pelo total apoio na realização de ensaios, testes e dosagens no Laboratório de Materiais de Construção Civil da PUCRS.

À amiga Odete Boff, por disponibilizar seu tempo e conhecimento acadêmico na correção da estrutura gramatical deste trabalho. Agradecimento especial a Paulo Boff e Davi Boff por concordar em abrir mão da presença da esposa e mãe, junto à família. Ao apoio de Paulo e Odete durante a realização deste trabalho, aos incentivos e ao exemplo deles como profissionais buscando conhecimento contínuo.

Ao professor Jairo José de Oliveira Andrade pelas contribuições durante o trabalho.

À amiga Vanessa Marzulo pela correção de estrutura gramatical do anteprojeto.

Ao engenheiro Giovane Weissheimer da Allquímica pelo fornecimento de aditivos e aos valiosos conselhos que ajudaram o início deste trabalho e ao prestativo técnico Robson Bezner, também da Allquímica, pelo apoio no fornecimento de aditivos.

Aos professores e à equipe da secretaria de Pós-Graduação em Engenharia e Tecnologia de Materiais (PGETEMA).

*Embora ninguém possa voltar
atrás e fazer um novo começo,
qualquer um pode começar agora
e fazer um novo fim.*

(Chico Xavier)

SUMÁRIO

DEDICATÓRIA	4
AGRADECIMENTOS	5
SUMÁRIO	7
LISTA DE FIGURAS	12
LISTA DE TABELAS	16
LISTA DE QUADROS	18
LISTA DE SÍMBOLOS.....	19
RESUMO	22
ABSTRACT	23
1. INTRODUÇÃO.....	23
1.1. Considerações gerais	24
2. OBJETIVOS	28
2.1. Objetivo geral	28
2.2. Objetivos específicos	28
3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	30
3.1. Origem do CAA.....	30
3.2. Materiais constituintes e teor de argamassa.....	33
3.2.1. Cimento.....	34
3.2.2. Água	36
3.2.3. Materiais finos.....	37
3.2.4. Agregados miúdos.....	38
3.2.5. Agregados graúdos	40
3.2.6. Aditivos superplastificantes (SP)	41
3.2.7. Aditivos modificadores de viscosidade (VMA).....	44
3.2.8. Teor de argamassa	45
3.3. Comportamento reológico do concreto fresco	46
3.4. Trabalhabilidade do concreto fresco.....	50

3.5. Ensaio para avaliação da trabalhabilidade do CAA	53
3.5.1. Método do cone de Abrams: ensaio de espalhamento e tempo de escoamento (t_{500}).....	58
3.5.2. Método da coluna de segregação	59
3.5.3. Método da caixa L.....	61
3.5.4. Método do funil V	62
3.6. Métodos de dosagem para a obtenção do CAA	64
3.6.1. Método de dosagem de Díaz	64
3.6.2. Modelo de Empacotamento Compressível (MEC).....	65
3.6.2.1. Empacotamento virtual de uma mistura granular	65
3.6.2.2. Mistura binária sem interação	66
3.6.2.3. Mistura binária com interação total	67
3.6.2.4. Mistura binária com interação parcial	67
3.6.3. Comentários sobre o proporcionamento dos agregados	69
3.6.4. Método de dosagem de concreto convencional do IPT/EPUSP de Helene e Terzian (1992)	71
3.6.5. Proporções necessárias para obter o CAA – Método Okamura et al.	73
3.6.6. Método de Gomes et al (2002).....	79
3.6.6.1. Seleção dos materiais.....	80
3.6.6.2. Definição da composição da pasta	80
3.6.6.3. Definição do esqueleto granular	82
3.6.6.4. Determinação da composição do CAA	82
3.6.7. Método de dosagem de Repette e Melo (2005).....	82
3.6.7.1. Composição da pasta	83
3.6.7.1.1 Determinação da relação a/c	83
3.6.7.1.2 Teor de finos	83
3.6.7.2. Composição da argamassa	84
3.6.7.2.1 Teor de agregado miúdo	84
3.6.7.2.2 Ajuste final do teor de adição	84
3.6.7.3. Composição do concreto	85
3.6.7.3.1 Teor de agregado graúdo.....	85
3.6.7.3.2 Ajuste final do SP	85
3.6.7.4. Avaliação das propriedades mecânicas.....	85

3.6.8. Método de dosagem de Tutikian (2004)	86
3.6.8.1. Escolha dos materiais.....	86
3.6.8.2. Determinação do teor ideal de argamassa seca.....	87
3.6.8.3. Determinação dos traços rico, intermediário e pobre	87
3.6.8.4. Colocação de SP e conseqüente segregação	87
3.6.8.5. Acerto dos finos por substituição	88
3.6.8.6. Ensaio de trabalhabilidade até o concreto convencional virar CAA	
88	
3.6.8.7. Comparação do CAA com e sem VMA.....	88
3.6.8.8. Ensaio de resistência à compressão nas idades determinadas	88
3.6.8.9. Desenho do diagrama de dosagem.....	88
3.6.9. Método de dosagem de Tutikian e Dal Molin (2007)	89
3.6.9.1. Escolha dos materiais.....	89
3.6.9.2. Determinação do esqueleto granular	89
3.6.9.3. Determinação da relação a/c ou teor de SP	90
3.6.9.4. Mistura dos traços rico, intermediário e pobre	91
3.6.9.5. Ensaio das propriedades mecânicas e de durabilidade nas idades	
determinadas 91	
3.6.9.6. Desenho dos diagramas de dosagem e desempenho	91
3.6.10. Método de dosagem de Alencar e Helene (2006)	91
3.6.11. Comparação entre os métodos nacionais de dosagem de CAA.....	94
3.7. Avaliação das propriedades no estado endurecido.....	102
3.7.1. Propriedades mecânicas.....	102
3.7.1.1. Resistência à compressão axial.....	102
3.7.2. Aspectos de durabilidade	104
3.7.2.1. Absorção de água por imersão.....	105
3.7.2.2. Absorção de água por capilaridade	108
4. MATERIAIS E MÉTODOS	109
4.1. Planejamento Geral.....	109
4.2. Caracterização dos Materiais Utilizados	113
4.2.1. Cimento	113
4.2.2. Aditivos.....	114

4.2.3.	Agregados Miúdos e Graúdos	115
4.3.	Proporcionamento dos agregados.....	116
4.3.1.	Proporcionamento dos agregados pelo procedimento de dosagem proposto na dissertação.....	116
4.3.1.1.	Proporcionamento entre os agregados miúdos	116
4.3.1.2.	Proporcionamento entre os agregados graúdos.....	118
4.3.2.	Proporcionamento dos agregados pelo método Tutikian e Dal Molin (2007) 120	
4.3.2.1.	Combinação entre brita 1 e brita 0.....	121
4.3.2.2.	Combinação entre areia média e a mistura de brita 1 e brita 0	122
4.3.2.3.	Combinação entre areia fina e a mistura de britas 1/0 e areia média 123	
4.3.3.	Proporcionamento dos agregados pelo método Alencar e Helene (2006) 124	
4.4.	Dosagem dos concretos.....	125
4.4.1.	Dosagem do CAA e do concreto convencional pelo procedimento proposto no trabalho	125
4.4.2.	Dosagem do CAA pelo método Tutikian e Dal Molin (2007).....	127
4.4.3.	Dosagem do CAA pelo método Alencar e Helene (2006).....	128
5.	RESULTADOS E DISCUSSÕES	130
5.1.	Comportamento no estado fresco	130
5.1.1.	Ensaio de trabalhabilidade do concreto convencional	130
5.1.2.	Ensaio de trabalhabilidade dos CAAs: procedimento do trabalho, método Tutikian e Dal Molin (2007) e método Alencar e Helene (2006)	131
5.2.	Diagramas de dosagem.....	138
5.3.	Propriedades no estado endurecido dos concretos dosados	150
5.3.1.	Relação entre absorção de água por imersão, absorção de água por capilaridade e relação a/c.....	152
5.3.2.	Relação entre resistência à compressão e índice de vazios	153
5.4.	Custo unitário do concreto.....	156
6.	CONCLUSÕES	161
7.	PROPOSTAS PARA TRABALHOS FUTUROS	163

8. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	164
ANEXOS	177
APÊNDICE	179

LISTA DE FIGURAS

- Figura 3.1: Exsudação versus abatimento para concretos sem SP e com diferentes consumos de cimento 300-350-400 kg/m³ (Collepari, 2001, p.12)..... 42
- Figura 3.2: Exsudação versus abatimento para concretos com SP e com diferentes consumos de cimento 300-350-400 kg/m³ (Collepari, 2001, p.12)..... 43
- Figura 3.3: Aglomeração das partículas de cimento antes (A) e após a adição de SP (B) (Collepari, 2001, p.16)..... 43
- Figura 3.4: Comportamentos de fluxo possíveis para diferentes materiais (Hoppe Filho e Cincotto & Pileggi (apud Alencar, 2008, p.17))..... 49
- Figura 3.5: Comportamento reológico de diversos tipos de concretos (Nunes, 2001, p.51)..... 50
- Figura 3.6: Efeito da proporção binária de agregados sobre a trabalhabilidade do concreto (Maslehuddin et al., 1995, p.206). 53
- Figura 3.7: Dimensões, em milímetros, dos equipamentos do ensaio e posições para medir o resultado de espalhamento e t_{500} (Guidelines for testing fresh self-compacting concrete, 2005, p.6). 59
- Figura 3.8: Desenho esquemático do ensaio coluna de segregação, dimensões em milímetros (Alencar, 2008, p.37). 60
- Figura 3.9: Dimensões básicas em milímetros do ensaio caixa L (EFNARC, 2005, p.54). 62
- Figura 3.10: Dimensões básicas em milímetros do funil V (EFNARC, 2005, p.51). . 63
- Figura 3.11: Estrutura cristalina de faces centradas (CFC) (Callister, 2002, p.22). .. 66
- Figura 3.12: Estrutura cristalina de corpo centrado (CCC) (Callister, 2002, p.23). ... 66
- Figura 3.13: Mistura binária sem interação: (a) classe 1 dominante; (b) classe 2 dominante (Formagini, 2005, p.17). 66
- Figura 3.14: Evolução de compactidade em função da proporção de grãos finos em uma mistura binária sem interação (De Larrard, 1999, p.36)..... 67

Figura 3.15: Mistura binária com interação parcial: efeito parede (Formagini, 2005, p.21).....	68
Figura 3.16: Mistura binária com interação parcial: (a) mistura sem perturbação, (b) efeito de afastamento exercido pelo grão de diâmetro menor sobre o grão de diâmetro maior (Formagini, 2005, p.20).....	68
Figura 3.17: Evolução da compacidade de um sistema binário em função da proporção de grãos finos. Caso geral (De Larrard, 1999, p.39).....	69
Figura 3.18: Diagrama de dosagem (Helene e Terzian, 1992, p.233).....	72
Figura 3.19: Comparação entre o proporcionamento do CAA e o do concreto convencional (Okamura e Ouchi, 2003, p.5).....	74
Figura 3.20: Metodologia para obter o CAA (Okamura e Ozawa (apud Okamura e Ouchi, 2003, p.6)).	75
Figura 3.21: Ensaio de espalhamento de argamassa (Okamura e Ouchi, 2003, p.7).76	
Figura 3.22: Ensaio funil V de argamassa (Okamura e Ouchi, 2003, p.7).....	76
Figura 3.23: Relação entre os resultados de T_m e R_m da argamassa e o grau de autoadensabilidade do concreto. O círculo preto AA define o maior grau de autoadensabilidade, seguido pelo círculo laranja A e o círculo amarelo B de menor autoadensabilidade (Okamura e Ouchi, 2003, p.8).77	
Figura 3.24: Ensaio caixa U (Okamura e Ouchi, 2003, p.7).....	78
Figura 3.25: Diagrama do método de dosagem de Gomes et al (2002) (apud Gomes e Barros, 2009, p.145).	80
Figura 3.26: Exemplo da curva log T versus SP/c para determinação da dosagem de SP (Gomes e Barros, 2009, p.148).....	81
Figura 3.27: Fluxograma do método de dosagem de Repette e Melo (Melo, 2005, p.158).	83
Figura 3.28: Princípio básico do método proposto (Tutikian (apud Manuel, 2005, p.70)).....	86
Figura 3.29: Sequência geral de tomada de decisão para proporcionamento de materiais e verificação de trabalhabilidade, segundo método Alencar e Helene (Alencar e Helene (apud Alencar, 2008, p. 67).....	94

Figura 4.1: Fluxograma do programa experimental.	113
Figura 4.2: Gráfico da análise granulométrica dos agregados utilizados no trabalho.	116
Figura 4.3: Composição de areia média e fina, e o índice de vazios.	117
Figura 4.4: Equipamentos empregados no ensaio de compactação.	119
Figura 4.5: Combinação entre brita 1 e brita 0.	120
Figura 4.6: Índice de vazios da combinação entre brita 1 e brita 0.	122
Figura 4.7: Índice de vazios da combinação entre areia média com a mistura de brita 1 e brita 0.	123
Figura 4.8: Índice de vazios da combinação entre areia fina com a mistura de brita 1, brita 0 e areia média.	124
Figura 4.9: Betoneira utilizada para todas as dosagens.	127
Figura 5.1: Resultados do ensaio de espalhamento (mm) para os 3 métodos de dosagem.	132
Figura 5.2: Ensaio de espalhamento do CAA-R traço 1:3 (A) e ensaio de espalhamento do CAA-R traço 1:6.	132
Figura 5.3: Resultados do ensaio de escoamento t_{500} (s) para os 3 métodos de dosagem.	133
Figura 5.4: Resultados do ensaio da caixa L, relação HP, para os 3 métodos de dosagem.	134
Figura 5.5: Ensaio da caixa L do CAA-R traço 1:4,5.	134
Figura 5.6: Resultados do ensaio funil V (s) para os 3 métodos de dosagem.	135
Figura 5.7: Ensaio funil V do CAA-R com equipamento preenchido com concreto (A) e após a abertura da porta.	136
Figura 5.8: Resultados do ensaio de segregação, RS (%), para os 3 métodos de dosagem.	137
Figura 5.9: CPs seccionados (A e B) do CAA-R de traço pobre (1:6).	139

Figura 5.10: Diagrama de dosagem para o CCV-R para resistência à compressão aos 7 e 28 dias.....	144
Figura 5.11: Diagrama de dosagem para o CAA-R para resistência à compressão aos 7 e 28 dias.....	145
Figura 5.12: Diagrama de dosagem para o CAA-TD para resistência à compressão aos 7 e 28 dias.....	146
Figura 5.13: Diagrama de dosagem para o CAA-AH para resistência à compressão aos 7 e 28 dias.....	147
Figura 5.14: Diagrama de dosagem para o todos os concretos dosados para resistência à compressão aos 28 dias.	148
Figura 5.15: Gráfico que relaciona absorção por imersão e a relação a/c.....	153
Figura 5.16: Gráfico que relaciona índice de vazios e resistência à compressão aos 28 dias.....	154
Figura 5.17: Gráfico que relaciona índice de vazios e resistência à compressão aos 7 dias.....	155
Figura 5.18: Custo dos materiais por m ³ para produção dos CAAs e CCV-R, conforme resistências características selecionadas.	160

LISTA DE TABELAS

Tabela 3.1: Classes de espalhamento do CAA em função de sua aplicação (Adaptado da ABNT NBR 15823-1:2010, p.9).	56
Tabela 3.2: Classes de viscosidade plástica aparente do CAA em função de sua aplicação (Adaptado da ABNT NBR 15823-1:2010, p.10).	56
Tabela 3.3: Classes de habilidade passante do CAA em função de sua aplicação (Adaptado da ABNT NBR 15823-1:2010, p.10).	57
Tabela 3.4: Classes de resistência à segregação do CAA em função de sua aplicação (Adaptado da ABNT NBR 15823-1:2010, p.11).	57
Tabela 3.5: Exemplo de resultados dos ensaios para escolha do teor de agregado miúdo (Melo, 2005, p.161).	84
Tabela 3.6: Limites de aceitação do CAA, conforme ensaio (Melo, 2005, p.163). ...	85
Tabela 4.1: Composição química (dados do fabricante).	113
Tabela 4.2: Exigências físicas e mecânicas (dados do fabricante).	114
Tabela 4.3: Características do aditivo plastificante (dados do fabricante).	114
Tabela 4.4: Características do aditivo superplastificante (dados do fabricante).	114
Tabela 4.5: Análise granulométrica e massas específicas e unitárias dos agregados utilizados.	115
Tabela 4.6: Ensaio de compacidade entre areia média e areia fina.	117
Tabela 4.7: Ensaio de compacidade entre brita 1 e brita 0.	119
Tabela 4.8: Ensaio de compacidade entre brita 1 e brita 0.	121
Tabela 4.9: Ensaio de compacidade entre areia média e a mistura de brita 1 e brita 0.	122
Tabela 4.10: Ensaio de compacidade entre areia fina e a mistura de brita 1, brita 0 e areia média.	123

Tabela 5.1: Resultado do ensaio de abatimento do tronco de cone do CCV-R para cada traço-base.	130
Tabela 5.2: Resultado dos ensaios de trabalhabilidade para os CAAs dosados pelos 3 métodos.	131
Tabela 5.3: Traços unitários para o CCV e os CAAs dosados experimentalmente.	142
Tabela 5.4: Consumos de materiais por m ³ para o CCV e os CAAs dosados experimentalmente.....	143
Tabela 5.5: Equações de comportamento e R ² para o CCV e os CAAs aos 28 dias.	149
Tabela 5.6: Tabela resumo dos concretos dosados experimentalmente com seus respectivos resultados de resistência à compressão, absorção por imersão, índice de vazios e absorção capilar.....	150
Tabela 5.7: Tabela comparativa de resultados de absorção por imersão para diferentes concretos.....	152
Tabela 5.8: Resultados de trabalhabilidade para o CAA-TD Extras.	155
Tabela 5.9: Traços unitários para o CAA-TD Extras.	155
Tabela A.2: Teste experimental do traço rico 1:3 para determinação do teor de argamassa seca que garanta a coesão da mistura e resulte em um valor de consistência do ensaio de tronco de cone igual a 250 ±20 mm.....	178
Tabela A.1: Custos dos materiais por kg (R\$/kg).....	179

LISTA DE QUADROS

Quadro 3.1: Lista de ensaios para medição da trabalhabilidade do CAA (Adaptado da EFNARC, 2002, p.7).	54
Quadro 3.2: Comparação entre os métodos nacionais de dosagem de CAA.....	96

LISTA DE SÍMBOLOS

A	Característica do agregado graúdo conforme método de dosagem de Díaz
a/agl	Relação água/aglomerante
a/c	Relação água/cimento
a/f	Relação água/finos
C	Consumo teórico de cimento por m ³ de concreto
C ₃ A	Aluminato Tricálcico
CAA	Concreto autoadensável
CCC	Estrutura cristalina cúbica de corpo centrado
CCV	Concreto convencional
CEB	Comitê Europeu de Concreto
CFC	Estrutura cristalina cúbica de face centrada
CIENTEC	Fundação de Ciência e Tecnologia
cm	Centímetro
CP	Corpo-de-prova
d ₁	Diâmetro do grão de maior diâmetro
d ₂	Diâmetro do grão de menor diâmetro
D _{final}	Média aritmética da medida dos diâmetros perpendiculares do ensaio de espalhamento
dm	Decímetros
dm ³	Decímetro cúbico
EFNARC	European Federation for Specialist Construction Chemicals and Concrete Systems
EPUSP	Escola Politécnica da Universidade de São Paulo
f/c	Relação finos/cimento
FEA	Fator de empacotamento atômico
g/cm ²	Grama por centímetro quadrado
H	Altura do concreto no ensaio caixa U
H	Relação água/materiais secos em massa
H ₁ e H ₂	Altura do concreto em determinados trechos do ensaio da caixa L
IBRACON	Instituto Brasileiro do Concreto

IPT	Instituto de Pesquisas Tecnológicas
Kg/dm ³	Quilograma por decímetro cúbico
kg/kg	Quilograma por quilograma
kg/L	Quilograma por litro
kg/m ³	Quilograma por metro cúbico
m	Relação agregados totais/cimento, em massa
m ² /kg	Metro quadrado por quilograma
m ³	Metro cúbico
MEC	Modelo de empacotamento compressível
ml	Mililitro
mm	Milímetro
MPa	Megapascal
RB	Relação de bloqueio do ensaio caixa L
RCG	Resíduo de corte de granito
R _c	Viscosidade do concreto avaliada através ensaio funil V
R _m	Viscosidade da argamassa avaliada através ensaio funil V
s	Segundos
SP	Superplastificante
SP/c	Relação superplastificante/cimento
SP/mf	Relação superplastificante/materiais finos
β ₁	Compacidade quando existe somente grãos grosseiros na mistura
β ₂	Compacidade quando existe somente grãos finos na mistura
T	Tempo de fluxo da pasta avaliado no ensaio de cone de Marsh
<i>T</i>	Teor ideal de substituição
T ₁₁₅	Tempo para a pasta atingir a marca de 115 milímetros de diâmetro no ensaio de miniabatimento
t ₅₀₀	Tempo para o concreto atingir a marca de 500 milímetros de diâmetro no ensaio de espalhamento
T _c	Fluidez do concreto avaliada através do ensaio de espalhamento
T _m	Fluidez da argamassa avaliada através do ensaio de espalhamento de argamassa
V _a /V _f	Relação água/materiais finos, em volume
VMA	Modificador de viscosidade

y_2	Proporção de grãos finos de uma mistura granular
α	Teor de argamassa seca
γ	Compacidade de uma mistura granular segundo o MEC
%m.c	Porcentagem de superplastificante em relação a massa de cimento

RESUMO

FOCHS, Rafael Gómez. **Estudo comparativo entre métodos de dosagem de concretos autoadensáveis**. Porto Alegre. 2011. Dissertação. Programa de Pós-Graduação em Engenharia e Tecnologia de Materiais, PONTIFÍCIA UNIVERSIDADE CATÓLICA DO RIO GRANDE DO SUL.

A introdução do concreto autoadensável (CAA), primeiramente buscando sanar o problema da redução de mão de obra qualificada no Japão, apresentou diversas oportunidades de melhoria de qualidade e produtividade na indústria da construção. Pesquisadores, desde então, vêm desenvolvendo trabalhos a fim de compreender e tornar a dosagem experimental do CAA tão clara e sistemática como a do concreto convencional.

No Brasil, os métodos experimentais de dosagem de CAA podem ser divididos em dois grupos. Os métodos do primeiro grupo baseiam-se na adição de agregados e avaliam a mistura desde a etapa de formulação da pasta até o ajuste final do concreto. O segundo grupo avalia o concreto como um todo e utiliza conceitos do método IPT/EPUSP de Helene e Terzian (1992).

Na presente pesquisa foram comparados os métodos de dosagem de CAA de Tutikian e Dal Molin (2007) e Alencar e Helene (2006), ambos pertencentes ao segundo grupo, e um CAA obtido através de metodologia desenvolvida neste trabalho. Todos os CAAs foram dosados com areia fina e para cada método foi dosado uma família composta por três traços-base.

Para a obtenção do CAA resultante, foram utilizados conceitos dos métodos CIENTEC e IPT/EPUSP de Helene e Terzian (1992), além de considerar o teor de argamassa seca e o teor de aditivo superplastificante em relação ao cimento variável para cada traço-base de uma mesma família.

Os resultados dos ensaios de trabalhabilidade, no estado fresco, e de resistência à compressão, absorção de água por imersão e por capilaridade, no estado endurecido, assim como o custo por m³ de concreto, demonstraram que o desempenho do CAA desenvolvido neste trabalho é consoante ou superior aos demais métodos.

Palavras-Chaves: concreto autoadensável (CAA); método de dosagem; areia fina.

ABSTRACT

FOCHS, Rafael Gómez. **A comparative study among mix design methods of self-compacting concrete**. Porto Alegre. 2011. Master Thesis. Graduation Program in Materials Engineering and Technology, PONTIFICAL CATHOLIC UNIVERSITY OF RIO GRANDE DO SUL.

Self-compacting concrete (SCC) was first developed in Japan as an attempt to solve the problem of scarce skilled labor. Its introduction provided several opportunities for improved quality and productivity in the construction industry. Since then, researchers have developed research activities to understand and make the trial mix design of the self-compacting concrete as clear and systematic as the mix proportions of conventional concrete nowadays.

In Brazil, trial mix design methods of SCC can be divided into two groups. The methods in the first group are based on the addition of aggregates, and the mix is evaluated from the paste formulation stage to the final adjustment of the concrete. The second group evaluates the concrete as a whole, and uses concepts of the IPT/EPUSP method proposed by Helene and Terzian (1992).

In this research, a comparison was made among Tutikian and Dal Molin's (2007), Alencar and Helene's mix-proportioning methods of SCC - both of which belong to the second group - and a SCC obtained through a method developed in this work. All the SCC's were mixed with fine sand, and for each method, a family with three base concrete compositions was mixed.

The concepts of the CIENTEC and IPT/EPUSP methods proposed were used for obtaining the resulting self-compacting concrete. Besides, the dry mortar content and the superplasticizer additive content were considered in relation to the variable cement for each base concrete composition of a same family.

The results of the trials conducted to test the fresh state workability, the compressive strength, the water absorption by immersion and capillarity in the hardened state, as well as the cost by the cubic meter of concrete, showed that the performance of the SCC developed in this work is equivalent or superior to the other methods.

Key Words: self-compacting concrete (SCC); mix design method; fine sand.

1. INTRODUÇÃO

1.1. Considerações gerais

Questões relacionadas com a durabilidade do concreto têm se tornado tema frequente de pesquisas pela comunidade científica, em virtude dos custos elevadíssimos de reparação e reabilitação das estruturas em concreto armado e protendido, conforme aponta Nunes (2001). Os custos com reparos e substituições devido a falhas nos materiais têm se convertido em um volume substancial no orçamento das construções. Em países industrializados, Mehta e Monteiro (1994) estimam que, mais de 40% do total de recursos da indústria da construção, são aplicados em reparos e manutenções de construções existentes.

É fato notório que a durabilidade das estruturas em concreto deve-se, em grande parte, à qualidade da sua execução. Dessa forma, Nunes (2001) esclarece que as dificuldades no correto adensamento do concreto, em zonas com taxa de armadura elevada, refletem-se nos requisitos que devem ser atendidos pelo concreto.

Assim, Okamura e Ouchi (2003) relatam que, no início da década de 80, o problema da durabilidade das estruturas em concreto armado passou a ser uma das questões de maior interesse no Japão. Como a produção de estruturas em concreto duráveis requer adequado adensamento por trabalhadores especializados, a redução gradual dessa mão-de-obra na indústria japonesa provocou o declínio da qualidade das estruturas em concreto. Naquele contexto, uma alternativa para obtenção de estruturas em concreto duráveis, independente da mão-de-obra, foi a utilização do concreto autoadensável (CAA).

Gomes e Barros (2009, p.11) destacam a relevância do CAA:

O CAA é um concreto especial, não apenas por suas características próprias, mas também por ter sido inicialmente desenvolvido para sanar um dos principais problemas ocorridos durante a concretagem de peças de formas complexas e alta densidade de armadura: a deficiência na etapa da vibração do concreto, que, após o endurecimento, culmina na formação de nichos e pontos de mais fácil acesso de substâncias deletérias, afetando substancialmente a durabilidade das estruturas.

O CAA é descrito como umas das grandes revoluções ocorridas na tecnologia do concreto nas últimas décadas. Desenvolvido, inicialmente, para garantir o adensamento adequado do concreto sem dependência da habilidade do operário, o CAA provou sua vantagem técnica, econômica e ambiental por inúmeros fatores, entre os quais a EFNARC (2002), Gomes e Barros (2009), Koehler e Fowler (2007) e Tutikian e Dal Molin (2008) mencionam: maior velocidade de produção, já que seu lançamento é muito rápido e dispensa adensamento; aumento de qualidade com a redução de falhas de concretagem resultantes de má vibração; ganhos ecológicos visto que pode utilizar, em sua composição, teores de resíduos industriais e diminuição do ruído gerado por equipamentos de adensamento.

Os mesmos autores afirmam que o CAA aumenta a qualidade das estruturas em concreto e torna a indústria da construção civil mais competitiva, reduzindo desperdícios e tempos de produção.

Apesar das vantagens apresentadas acima, Takada (apud Manuel, 2005, p.24) observa:

hoje ainda se pode constatar que o domínio da tecnologia em volta do CAA é bastante restrito, sendo que apenas alguns poucos países têm algum domínio sobre o assunto, como o Japão, a Suécia, o Reino Unido, a Holanda, a França, a Dinamarca, o Canadá, a Tailândia e a Austrália.

De um lado, Tutikian (2007) verifica que, surpreendentemente, alguns profissionais partem de métodos de dosagem desenvolvidos há mais de 20 anos para criar misturas de CAA, sem considerar os métodos existentes nacionalmente, mais recentes. Outros profissionais tomadores de decisão, de forma ainda mais grave, não utilizam o CAA e optam por outro tipo de concreto, fundamentando que seu custo é elevado ou que suas propriedades no estado endurecido podem comprometer o desempenho da estrutura.

Por outro lado, Helene (2005) ressalta que hoje a oferta de tipos de concretos é acompanhada por uma série de métodos de dosagem que prometem obter o concreto ideal ao menor custo possível. Alerta também que alguns profissionais inseguros relegam seus conhecimentos básicos, fundamentais e imutáveis de tecnologia de concreto, em busca de novas receitas e “mágicas”, que nem sempre dão bons resultados.

Ele comenta também sobre a diversificação dos métodos de dosagem de concreto convencional no Brasil:

Essa grande diversificação dos métodos “nacionais” de dosagem impediu, até o presente, que os aspectos comuns pudessem ser aprofundados e uniformizados, de tal maneira que continua prevalecendo o método de cada um.

A partir do exposto, é possível observar um andamento muito próximo das proposições de métodos nacionais de dosagem de CAA, possivelmente demonstrando, assim como o que ocorre com o concreto convencional, a necessidade de aprofundamento científico e uniformização de aspectos comuns entre os seus métodos de dosagem.

O estudo e a pesquisa em torno do CAA enquadram-se em um contexto bastante atual no cenário nacional e internacional, com diversas instituições de ensino realizando pesquisas sobre o tema. Embora exista razoável bibliografia nacional com a descrição de um ou mais métodos de dosagem de CAA,

desenvolvidos no Brasil e no exterior, conforme assinalam Gomes e Barros (2009), Alencar (2008), Tutikian e Dal Molin (2008), Tutikian (2007), Melo (2005) e Tutikian (2004), existem poucos estudos teóricos e/ou experimentais que estabeleçam comparações entre as propostas de dosagem apresentadas e que mostrem, através de exemplos laboratoriais, as características e as propriedades das misturas obtidas por cada um dos diferentes métodos, quando são empregados os mesmos materiais.

Desta maneira, esta pesquisa pretendeu evidenciar alguns dos aspectos e características comuns e individuais dos principais métodos de dosagem de CAA empregados no Brasil. Foram selecionados, dentre os métodos nacionais de dosagem de CAA identificados, e, a partir de critérios apresentados na dissertação, dois métodos para a comparação através do estudo de dosagem experimental. O estudo comparativo também incluiu um concreto convencional, de referência, e um CAA, ambos dosados a partir das contribuições teóricas e práticas do professor Fernando Antônio Piazza Recena.

Através deste estudo comparativo teórico e experimental, espera-se ampliar o conhecimento em torno do CAA e verificar comportamentos importantes no processo de sua dosagem nos diferentes métodos.

2. OBJETIVOS

2.1. Objetivo geral

Comparar, através da dosagem experimental em laboratório e com base na literatura, os métodos de dosagem de CAA de Tutikian e Dal Molin (2007), Alencar e Helene (2006) e o procedimento de dosagem de CAA e de concreto convencional utilizado neste trabalho.

2.2. Objetivos específicos

São objetivos específicos desta pesquisa:

- a) comparar teoricamente os métodos de dosagem de CAA nacionais, identificando particularidades, semelhanças e vantagens e/ou desvantagens da sua utilização;
- b) obter um CAA com um nível de autoadensabilidade conforme definido neste trabalho, através das contribuições do professor Fernando Antônio Piazza Recena, utilizando para isso: um esqueleto granular adequado, a contribuição de finos provenientes do cimento e areia fina, uma baixa dosagem de superplastificante e um baixo teor de argamassa seca;
- c) verificar se é mais vantajoso, considerando-se a resistência e o custo, aumentar a dosagem de superplastificante e reduzir a quantidade de água adicionada, ou manter a mesma relação superplastificante por cimento para todos os traços-base, adicionando a água necessária para atingir

determinada trabalhabilidade, conforme é preconizado pelos métodos abordados neste trabalho;

- d) comparar os custos por m^3 entre todos os CAAs e o concreto convencional para as resistências à compressão de 30, 40 e 50 MPa aos 28 dias;
- e) comparar os resultados dos ensaios de durabilidade entre todos os CAAs e o concreto convencional para os traços-base 1:3, 1:4,5 e 1:6 a partir dos seguintes critérios: ensaio de absorção por imersão, aos 28 dias, e ensaio de absorção por capilaridade, aos 104 dias.

3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1. Origem do CAA

Concretos que necessitam de pouca vibração ou adensamento têm sido usados na Europa desde o início da década de 70, mas o CAA foi somente desenvolvido nos anos 80, no Japão. A EFNARC (2005) reconhece que, na Europa, o CAA foi provavelmente utilizado pela primeira vez na construção de sistemas viários da Suécia, em meados de 1990.

A possibilidade de desenvolver um concreto que pudesse ser compactado somente com a ação da gravidade, sem a utilização de vibração, foi apresentada por Okamura, em 1986. Conforme esse pesquisador e Ouchi (2003), o protótipo desse concreto foi finalizado em 1988, com materiais encontrados no mercado. A partir do ano 2000, Ouchi et al. (2003) verificam que a quantidade de CAA utilizado em produtos pré-fabricados e em concreto usinado, no Japão, foi próximo a 400.000 m³¹.

A partir do CAA desenvolvido naquele país, diversas outras nações européias, interessadas em explorar sua importância e potencial, formaram um

¹Para Okamura e Ouchi (2003), ainda que este volume não chegue a representar 1% do total de concreto produzido no Japão, naquele ano, verifica-se um crescimento gradual do consumo ano a ano.

grande consórcio em 1996, com o desafio de criar um projeto que viabilizasse a utilização do CAA em aplicações na Europa. O projeto recebeu o título de “Rational Production and Improved Working Environment Through Using Self-compacting Concrete”, de acordo com Ouchi et al. (2003). Ele contou com grandes empresas da França e da Suécia, centros de investigação e universidades, além de fabricantes de fibras e aditivos. Nunes (2001) aponta que o objetivo principal do projeto consistiu em desenvolver métodos de produção e transporte adequados para o CAA, bem como a otimização da organização da obra, tornando a construção mais competitiva e com custos reduzidos.

Adicionalmente foram iniciadas investigações e desenvolvidos trabalhos na França, Suécia, Islândia e Inglaterra, de maneira a publicar recomendações para a produção de CAA. Na Holanda, o Prof. Walraven visitou a universidade de Tóquio, tomando conhecimento da tecnologia do CAA e buscando, já de volta em seu país, apoio para desenvolver investigações sobre o assunto. O grupo do Prof. Walraven recebeu apoio financeiro e a introdução de *know how*, com a vinda de um pesquisador japonês com experiência no CAA. Dessa forma, conforme Nunes (2001) aponta, rapidamente, a indústria holandesa de concreto usinado e de pré-fabricados demonstrou interesse no desenvolvimento de projetos para a produção de CAA.

No Brasil, a partir das informações de Gomes e Barros (2009), Alencar (2008), Tutikian e Dal Molin (2008) e Melo (2005), dentre os principais trabalhos de referência de dosagem de CAA, podem-se citar os desenvolvidos na Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS), através das pesquisas de Tutikian (2004 e 2007), com a proposição de duas metodologias de dosagem; na Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC), através da dissertação de Melo (2005) que resulta no método de dosagem Repette-Melo; na Universidade Federal de Alagoas (UFAL), por meio dos trabalhos de Gomes et al. (2002 e 2003), que produziram um método de dosagem de CAA de alta resistência; e na Escola Politécnica da Universidade de São Paulo (EPUSP), com a elaboração da metodologia de dosagem de Alencar e Helene (2006).

É necessário destacar que Collepardi (2001) considera que concretos com características próximas do CAA, com alta resistência à segregação e que não necessitavam de vibração ou compactação, já haviam sido utilizados na década de 70. Dados da literatura internacional indicam que concretos autonivelantes e com resistência à segregação foram primeiramente estudados entre 1975 e 1976, conforme Collepardi (1975 apud Collepardi, 2001, p.2) e Collepardi (1976 apud Collepardi, 2001, p.2). Já, na década de 80, foram publicados trabalhos sobre a utilização de concretos autonivelantes e sem a necessidade de vibração em Hong Kong, Nova Iorque e Trieste. Estes concretos foram produzidos com materiais convencionais acrescidos de aditivos superplastificantes (SP), modificadores de viscosidade (VMA) e adições.

Collepardi (2001, p.2) faz também o seguinte registro:

O termo concreto autoadensável (CAA) refere-se a um novo tipo especial de concreto, caracterizado por alta resistência à segregação e que pode ser lançado sem compactação ou vibração. De acordo com a opinião do autor do presente artigo, este tipo de concreto ou um precursor muito próximo foi estudado e utilizado há 20-25 anos atrás.

Gebler (1982) e Mehta e Monteiro (1994) demonstram que a aplicação de concretos de alta trabalhabilidade em locais onde era inviável ou impraticável o adensamento mecânico, ocorreu antes de meados de 1986, data da apresentação do CAA por Okamura.

No Brasil, Giovannetti (1989) estudou a dosagem de concretos fluidos, com abatimento entre 180 e 250 mm, através do emprego de SP e de finos, este último

com objetivo de melhorar a capacidade de retenção de água e reduzir a exsudação². Segundo o autor estes concretos permitiam a redução da energia de compactação, mas não a eliminação do adensamento.

3.2. Materiais constituintes e teor de argamassa

Para Tutikian e Dal Molin (2008) os materiais utilizados para a elaboração do CAA são basicamente os mesmos utilizados para o concreto convencional. No caso do CAA, existe maior quantidade de finos (adições minerais quimicamente ativas ou sem atividade química), de SP e VMA.

Repette (2005, p.1510) informa que:

uma importante característica do CAA é o fato de ser produzido nas mesmas centrais e com os mesmos materiais empregados na produção do concreto convencional: brita, areia, cimento, adições e aditivos.

Skarendahl (2006) aponta como uma das principais vantagens do CAA a de que este pode ser produzido com cimento e agregados utilizados na produção de outros tipos de concreto.

Para Domone (2006), que analisou os materiais constituintes de 68 misturas de CAAs produzidos em diversos países, a principal diferença entre o CAA e o

²Segundo Mehta e Monteiro (1994), exsudação é um tipo de segregação. Para Petrucci (1998), entende-se por exsudação a tendência da água de amassamento de vir à superfície do concreto recém-lançado.

concreto convencional encontra-se basicamente no proporcionamento dos materiais listados abaixo:

- a) reduzido conteúdo de agregado graúdo;
- b) maior conteúdo de pasta;
- c) alto conteúdo de finos (partículas menores que 0,125 mm);
- d) baixa relação água/finos (a/f);
- e) alta dosagem de SP;
- f) utilização de modificador de viscosidade (VMA) (opcional).

3.2.1. Cimento

Gomes e Barros (2009, p.51) estabelecem que “todos os cimentos do tipo Portland, de acordo com as especificações de normas técnicas locais, podem ser utilizados na produção do CAA”.

Tutikian e Dal Molin (2008) também ressaltam que os mesmos cimentos utilizados na produção do concreto convencional podem ser utilizados no CAA, não havendo critérios científicos que especifiquem qual tipo de cimento é o mais adequado.

Entretanto, para Zhu e Bartos (2003, p.921), “CAAs sempre contêm eficientes superplastificantes necessários para subsidiar a alta fluidez das misturas”. Desta maneira, Mäder et al. (2004) verificam que, um determinado SP, pode funcionar de maneira adequada com um tipo de cimento e de maneira inadequada com outro.

Nkinamubanzi e Aïtcin (2004) assinalam que o teor de aluminato tricálcico (C_3A) e de álcalis solúveis do cimento, bem como a finura dos grãos do cimento, são alguns dos principais fatores que controlam a compatibilidade³ e a robustez⁴ da combinação entre cimento e SP.

Collepari (2005) relata que o conteúdo de C_3A , gesso e de álcalis, bem como a forma do sulfato de cálcio utilizado como regulador de pega do cimento, podem afetar a taxa de perda de trabalhabilidade da mistura cimentante. Quanto maior a quantidade de C_3A no cimento, maior a quantidade de SP necessária para atingir uma tensão de escoamento⁵ próxima a zero. Para Neville (1997), quanto mais fino o cimento maior será a dosagem de SP para se atingir uma determinada trabalhabilidade.

Zingg et al. (2009) verificam que, em cimentos com maior quantidade de C_3A , ocorre uma maior e mais rápida reação exotérmica, provavelmente indicando uma maior e mais rápida formação da etringita⁶. Para Helmuth et al. (1995) a formação de etringita reduz o conteúdo de água livre e aumenta o volume da fase sólida, produzindo perda de trabalhabilidade do concreto.

³Para Nkinamubanzi e Aïtcin (2004) e Neville (1997), quando a trabalhabilidade inicial de um concreto, que recebeu a adição de SP, é mantida por um longo período de tempo, significa que ocorreu uma compatibilidade entre o SP e o cimento.

⁴Segundo Nkinamubanzi e Aïtcin (2004) e a EFNARC (2005), comportamento robusto significa que uma pequena variação na quantidade ou na composição de um dos ingredientes da mistura, neste caso a dosagem do SP, não acarreta em uma grande variação nas propriedades do concreto no estado fresco.

⁵Conforme Tattersall (1991), tensão de escoamento é a tensão mínima necessária para iniciar o fluxo do material.

⁶De acordo com Mehta e Monteiro (1994), etringita é denominação de um dos produtos resultantes da hidratação do cimento Portland, que ocupa de 15% a 20% do volume de sólidos na pasta endurecida. O enrijecimento gradual e a pega da pasta estão associadas à formação deste produto.

3.2.2. Água

A água é imprescindível para a produção de concretos. Contudo, Recena (2011) esclarece que, se usada em quantidade maior que o necessário, poderá acarretar em alterações na resistência à compressão.

Segundo Gomes e Barros (2009, p.64):

A quantidade de água de uma mistura é dividida basicamente em quatro partes: uma para hidratação do cimento, uma para a absorção e adsorção dos agregados e materiais finos, uma para preencher a porosidade do esqueleto granular e uma para garantir a fluidez do concreto.

No CAA, a água pode aumentar a trabalhabilidade, reduzindo a tensão de escoamento e a viscosidade⁷ da mistura, aumentando assim a fluidez. Entretanto, para Alencar (2008), a partir de determinado ponto, pode ocorrer segregação dos materiais. Sedran (apud Gomes e Barros, 2009, p.98) comenta que, entre todos os componentes do concreto, a água é o principal elemento que controla a viscosidade da mistura.

Outro fato importante, destacado por Skarendahl (2006) e Koehler e Fowler (2007), é a maior sensibilidade do CAA em relação ao conteúdo total de água, quando comparado ao concreto convencional, pois as variações na umidade dos agregados podem causar perda da coesão e variações na fluidez da mistura.

⁷Para Tattersall (1991), viscosidade pode ser definida de maneira quantitativa, como a tensão de cisalhamento dividida pela taxa de cisalhamento, ou ainda de forma qualitativa, como a propriedade do material resistir crescentemente à deformação com o aumento da taxa de deformação.

3.2.3. Materiais finos

A EFNARC (2005) constata que agregados menores que 0,125 mm, incluindo frações de cimento, adições⁸ e agregados, são classificados como finos. Domone (2007) esclarece que os materiais finos presentes na mistura e necessários para a dosagem do CAA, geralmente consistem na combinação de cimento com adições como fíler calcário, escória de alto forno ou sílica ativa.

Tutikian (2004, p.91) faz observação sobre os finos adicionados no CAA:

Os finos podem ser pozolânicos, como cinza de casca de arroz, sílica ativa, metacaulim, escória de alto forno e outros, ou não pozolânicos, como cerâmica moída, fíler calcáreo e outros, desde que tenham área superficial maior do que o componente que estão substituindo.

As adições são utilizadas para melhorar e manter a coesão e a resistência à segregação do CAA, conforme dados da EFNARC (2005). Esses materiais, na visão de Zhu e Bartos (2003), são necessários para manter a estabilidade, ou seja, uma suficiente viscosidade da mistura, reduzindo a exsudação e a segregação.

As adições também irão regular o conteúdo de cimento em ordem a reduzir o calor de hidratação e a retração térmica do CAA, apontam os dados da EFNARC (2005).

⁸Conforme a EFNARC (2005), adições são materiais inorgânicos finamente divididos utilizados no concreto para melhorar determinadas características ou atingir propriedades especiais. Podem ser classificadas, de acordo com sua capacidade reativa, como materiais inertes, materiais pozolânicos ou ainda materiais cimentantes.

Para Moosberg-Bustness et al. (2004), a adição de partículas finas (com tamanho máximo de 0,125 mm) alteram as propriedades do concreto no estado fresco e endurecido, podendo agir na mistura de três maneiras:

- a) fisicamente - preenchendo os espaços entre os grãos de cimento e assim melhorando a compacidade do concreto;
- b) quimicamente em torno da superfície – quando estas partículas finas melhoram a distribuição dos produtos de hidratação e integram a pasta de cimento;
- c) quimicamente – quando as partículas finas reagem com componentes do cimento.

Collepari (2007) descreve um estudo comparativo entre dois CAAs, um com adição pozolânica e um com adição não pozolânica, e um concreto fluido, todos os três concretos com igual relação a/c e igual quantidade de cimento por metro cúbico. O autor sugere que um maior valor de resistência à compressão dos CAAs, quando comparado com o concreto fluido, é resultado da adição de finos que aumentam a compacidade da mistura. Adicionalmente, o autor avalia que, quando o fino for pozolânico, este também reage quimicamente com os produtos de hidratação do cimento Portland.

3.2.4. Agregados miúdos

As características de maior influência deste material no CAA são basicamente as mesmas na dosagem de um concreto convencional. Segundo Helene e Terzian (1992), a granulometria, o módulo de finura e a umidade são as principais características que agem sobre o resultado na dosagem do concreto convencional.

Dilek e Leming (2004) esclarecem que o efeito da forma e da distribuição granulométrica destes agregados sobre a demanda de água do concreto são particularmente importantes.

Para Hu e Wang (2006), normalmente quando se utiliza na argamassa agregados miúdos com menores índices de vazios, com uma curva granulométrica bem graduada, atinge-se melhores resultados de fluidez se comparado com argamassas que utilizam agregados miúdos com maiores índices de vazios.

Okamura e Ouchi (2003) sustentam que a forma e o conteúdo da areia na argamassa afetam a tensão de cisalhamento⁹ da mistura de CAA. Formas arredondadas e menores conteúdos de areia na argamassa resultam em menores tensões de cisalhamento para uma mesma tensão normal¹⁰ aplicada.

Pode-se também utilizar na produção do CAA areias de britagem. Westerholm et al. (2008) informam que essas areias se diferenciam das areias naturais normalmente pela maior quantidade de finos, pela forma mais lamelar dos grãos e pela superfície mais rugosa, características que afetam a reologia do concreto. A maior presença de finos melhora a coesão da mistura, já a forma lamelar aumenta o índice de vazios e reduz a trabalhabilidade da mistura.

De um lado, Klein (2008) verificou que CAAs produzidos com porcentagens de areias britadas superiores a 50%, em relação ao total de areia da mistura, apresentaram exsudação e segregação, segundo o autor, em função da distribuição granulométrica deficiente deste agregado que fez com que a viscosidade da argamassa presente no concreto fosse diminuída. Já, CAAs com uma porcentagem de substituição inferior a 30%, apresentaram estabilidade e uma maior viscosidade quando comparados com o CAA produzido com 100% de areia natural.

⁹Para Schramm (2006), tensão de cisalhamento é definida como a força aplicada tangencialmente em uma determinada área de um fluido em contato com um plano estacionário.

¹⁰Conforme Pinto (2000), o somatório de componentes normais ao plano, dividida pela área total que abrange as partículas em que estes contatos ocorrem, é definida como tensão normal.

Por outro lado, Nanthagopalan e Santhanam (2011) obtiveram resultados satisfatórios com a substituição de 100% da areia natural do concreto por areia britada. Para obter o CAA, combinaram adequadamente o agregado miúdo e finos de maneira a melhorar o pacote granular e utilizaram um volume de pasta superior ao normalmente empregado em um concreto produzido com areia natural.

3.2.5. Agregados graúdos

O diâmetro máximo do agregado deve ser limitado conforme espaçamento entre as barras de aço, sendo geralmente entre 12 mm e 20 mm. O tamanho e a forma dos agregados no CAA influenciam diretamente a fluidez e a capacidade de fluir coeso entre os obstáculos. Pesquisa da EFNARC (2005) aponta que, quanto mais esférico o agregado, menor será a possibilidade de ocorrer bloqueio da fluidez através de um obstáculo ou passagem estreita, e maior será a fluidez do CAA devido à redução do atrito entre os agregados.

Geiker et al. (2002) reconhecem que características como a relação comprimento/largura, forma e textura do agregado graúdo, assim como a fração de agregados graúdos na mistura, afetam a viscosidade e a tensão de escoamento do CAA.

Okamura e Ouchi (2003) e Nunes (2001) verificam que, quanto maior o volume de agregado graúdo, maior a probabilidade de contato e de travamento entre estas partículas, consumindo a energia que seria utilizada para o fluxo da mistura.

Recena (2011) observa que agregados graúdos, classificados como brita 0 ou pedrisco, em geral, apresentam maior superfície específica, maior quantidade de finos e menor massa unitária, em relação a brita 1, exigindo um teor maior de argamassa e uma maior massa de água sobre a massa total de materiais secos para atingir uma mesma trabalhabilidade que um concreto produzido com brita 1.

Helene e Terzian (1992) sugerem que a redução do custo do concreto convencional pode ser realizada através da mistura de duas faixas granulométricas de agregado graúdo, buscando a maior massa unitária no estado compactado, chamado composição “ideal” entre agregados. Assim, a quantidade de argamassa para preencher os vazios do agregado graúdo, seria reduzida.

Díaz (1998) propõe um método de proporcionamento de agregados graúdos e miúdos. A porcentagem de vazios e a superfície específica mínimos da mistura de agregados definem a combinação ótima. Caso sejam utilizados dois tipos de agregados graúdos, esses são combinados de maneira a determinar o menor índice de vazios.

3.2.6. Aditivos superplastificantes (SP)

Nas últimas três décadas, os principais ingredientes dos SP foram polímeros sintéticos solúveis em água à base de melanina, naftaleno e lignosulfonatos. Mais recentemente, novos SP, baseados na família de polímeros policarboxilatos, foram desenvolvidos, conforme Collerparadi (2005). Skarendhal (2005) esclarece que os produtos à base de melanina, naftaleno e lignosulfonatos pertencem à primeira e segunda geração de SP, enquanto os aditivos à base de polímeros policarboxilatos pertencem à terceira geração de SP.

De acordo com Mehta e Monteiro (1994, p.282):

Os superplastificantes, também chamados de aditivos redutores de água de alta eficiência, por serem capazes de reduzir o teor de água de três a quatro vezes, em um dado traço de concreto, quando comparados a aditivos redutores de água normais, foram desenvolvidos nos anos 70 e têm já ampla aceitação na indústria da construção em concreto.

Para Hartmann e Helene (2003, p.2):

Esses novos aditivos se propõem a reduzir a demanda de água em maior escala para concretos de abatimento constante e aumentar significativamente a fluidez de concretos com consumo de água constante.

Eiger (2006, p.56) comenta sobre os SP de terceira geração:

Produtos de última geração [...] também conhecidos como Policarboxilatos, estes produtos apresentam um mecanismo duplo de ação dispersante, derivado tanto da ação eletrostática, devido às cargas negativas existentes nos grupos carboxilatos ao longo da cadeia de polimetilmetacrilato, quanto da estabilização estérica, resultante dos grupos hidrofílicos laterais.

Collepardi (2001) demonstra que, com o advento dos SP, concretos fluidos com abatimento maior que 250 mm puderam ser produzidos praticamente sem a ocorrência de exsudação. As Figuras 3.1 e 3.2 mostram a relação entre exsudação e o resultado do ensaio de abatimento para concretos com três consumos de cimento (300, 350 e 400 kg/m³), sem e com a utilização de SP. Nos concretos sem este aditivo, verifica-se o elevado aumento da exsudação, para um abatimento maior de 175 mm, já, nos concretos com SP, a exsudação é mínima.

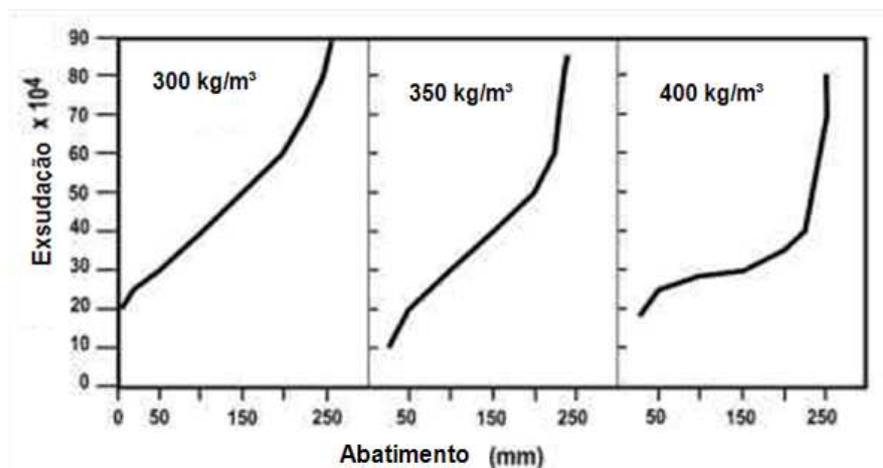


Figura 3.1: Exsudação versus abatimento para concretos sem SP e com diferentes consumos de cimento 300-350-400 kg/m³ (Collepardi, 2001, p.12).

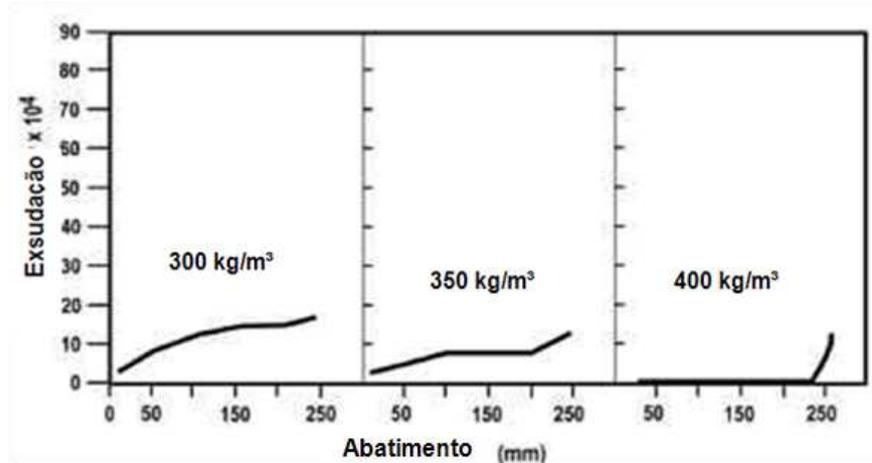


Figura 3.2: Exsudação versus abatimento para concretos com SP e com diferentes consumos de cimento 300-350-400 kg/m³ (Collepari, 2001, p.12).

Para os pesquisadores Collepari (2001), Rixon e Mailvaganam (1999), Neville (1997) e Roy e Silsbee (1995), a adição de SP em um sistema água e cimento, que anteriormente estava floculada, causa a dispersão das partículas de cimento. A Figura 3.3 ilustra o fenômeno.

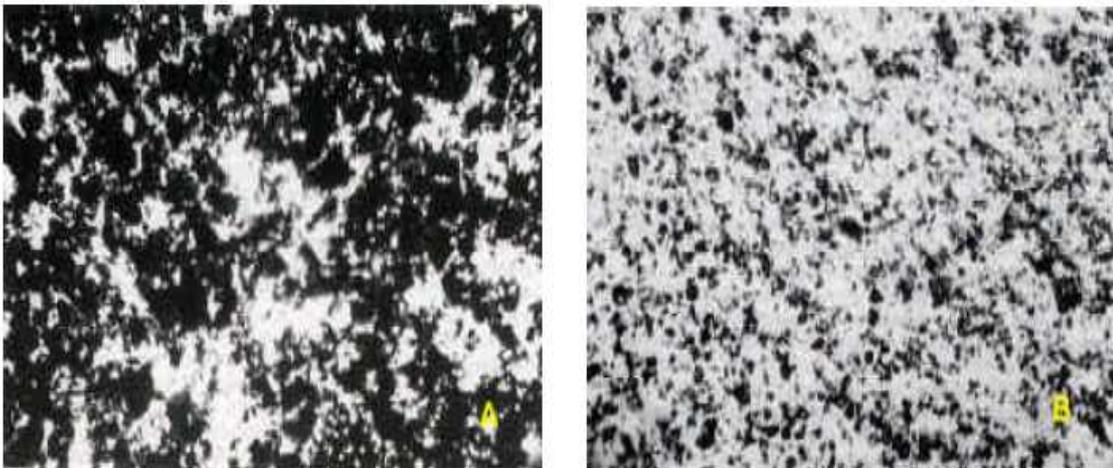


Figura 3.3: Aglomeração das partículas de cimento antes (A) e após a adição de SP (B) (Collepari, 2001, p.16).

Moosberg-Bustness et al. (2004) reiteram que SP agem no sistema da pasta do concreto, através da dispersão de partículas finas, melhorando o esqueleto granular e aumentando a resistência à compressão. Para Massaza e Testolin (apud Neville, 1997, p.266), o SP causa uma melhor distribuição das partículas de cimento e, conseqüentemente, uma melhor hidratação, resultando em um aumento da resistência à compressão para uma mesma relação a/c. Jiang e Gong (2008)

verificaram a aceleração do processo de hidratação do concreto e uma formação mais rápida de etringita em concretos com SP, quando comparados com concretos sem a utilização desse aditivo.

Hartmann e Helene (2003) verificaram, através de experimento realizado com dois SP à base policarboxilatos, melhores resultados em propriedades do concreto endurecido (resistência à compressão, módulo de elasticidade e penetração de íons de cloreto) quando comparado com concretos com aditivos plastificantes. Contudo, as propriedades avaliadas no estado fresco não se mostraram adequadas, principalmente no que diz respeito à manutenção de abatimento e à incorporação de ar.

A influência destes aditivos nas propriedades do concreto depende, entre outros fatores, da dosagem do cimento, da consistência, do processo de mistura, da temperatura ambiente, da natureza do cimento e da granulometria dos agregados. Almeida (2005) sugere também a utilização de aditivo plastificante em conjunto com o SP para diminuir a perda acelerada de abatimento. Quanto a esta última recomendação, Neville (1997) indica a realização de misturas experimentais para validar qualquer combinação de aditivos.

Tattersall (1991) afirma que a adição do SP, somente após o concreto ter sido totalmente misturado, é uma prática recomendada para aumentar a eficiência desse aditivo.

Recena (2011) ressalta que, embora em alguns casos o emprego de aditivos viabilize a adoção de determinada técnica, devemos ter a consciência de que somente o emprego desse produto não garante o comportamento adequado da mistura.

3.2.7. Aditivos modificadores de viscosidade (VMA)

Os aditivos modificadores de viscosidade agem no concreto de forma a aumentar a coesão da mistura, melhorando a estabilidade e a mobilidade do

concreto. Gomes e Barros (2009) assinalam que, com a redução da água livre da mistura, menor será a exsudação e poderá ocorrer melhora na suspensão de partículas sólidas, reduzindo a sedimentação.

3.2.8. Teor de argamassa

Para Helene e Terzian (1992), o excesso de argamassa na mistura do concreto convencional aumenta o custo por metro cúbico, como também o risco de fissuração por origem térmica e por retração de secagem.

Recena (2011) argumenta que o teor de argamassa de um concreto convencional deve representar um volume suficiente para preencher os espaços entre os agregados graúdos e permitir a movimentação relativa entre os grãos.

Okamura e Ouchi (apud Manuel, 2005, p.52-53) observam que o aumento do teor de argamassa da mistura do CAA é importante no sentido de aumentar a distância entre os agregados graúdos, reduzindo o número de colisões entre estes e a perda de energia que antes seria usada para o movimento do concreto.

Para Tutikian (2004), é possível produzir um CAA com o mesmo teor de argamassa de um concreto convencional, considerando a utilização dos mesmos materiais para ambos os concretos e empregando a metodologia de dosagem do IPT/EPUSP de Helene e Terzian (1992) para definir o teor ótimo de argamassa.

Manuel (2005) pesquisou traços¹¹ de CAA na literatura internacional e encontrou teores de argamassa empregados na dosagem, variando de 53,5% até 79,8%. O autor verificou também, através de dosagem experimental, melhores resultados, tanto do ponto de vista técnico como econômico em CAAs com teores de argamassa entre 54% e 60%.

Alencar (2008) produziu concretos para peças pré-moldadas com teores de argamassa, variando de 62% até 71%, dependendo do nível de trabalhabilidade requerido. Verificou também que um aumento no teor de argamassa é necessário para melhorar a habilidade passante do concreto entre restrições, principalmente quando não se utilizam adições.

3.3. Comportamento reológico do concreto fresco

A caracterização e o controle das propriedades do concreto no estado fresco, de suma importância no concreto convencional, são ainda mais críticas no CAA. Zerbino et al. (2009) esclarecem que, assim como no concreto convencional, foram desenvolvidos ensaios práticos e simples, como os ensaios de espalhamento e funil V, para a dosagem e controle de qualidade do CAA.

Roussel (2006), contudo, ressalta que o ensaio de abatimento pelo tronco de cone, no caso de um concreto convencional, não fornece um valor de parâmetro reológico. Da mesma forma, para o CAA, os ensaios utilizados também não fornecem valores de parâmetros reológicos. Segundo Zerbino et al. (2009), dois

¹¹Para Petrucci (1998), chama-se de traço à maneira de exprimir a composição do concreto, podendo ser indicado pelas proporções em massa, toma-se sempre o cimento como unidade e relacionam-se as demais quantidades à quantidade de cimento. Traços-base, neste trabalho, referem-se aos três traços (rico, intermediário e pobre) utilizados para construção das curvas de dosagem e cálculo das equações de correlação de dosagem.

CAAs com igual resultado de tempo de escoamento no ensaio de funil V, podem apresentar diferenças representativas em suas propriedades reológicas.

Assim, Zerbino et al. (2009) sustentam que uma adequada caracterização e entendimento do comportamento do CAA no estado fresco, a partir de equipamentos laboratoriais como os reômetros, é realizada através do estudo dos parâmetros reológicos.

Segundo Gomes e Barros (2009), os estudos reológicos permitem compreender o comportamento do CAA e realizar uma dosagem mais racional deste concreto.

Para a Schramm (2006), a reologia descreve a deformação de um corpo sob a influência de tensões. Castro (2007) define a reologia como o ramo da física voltado para o estudo da mecânica dos corpos deformáveis, os quais podem estar no estado sólido, líquido e gasoso. Para Roussel (2006), materiais cimentantes no estado fresco comportam-se como um fluido com uma determinada tensão de escoamento.

Miranda (2008) diz que os comportamentos dos fluidos, que independem do tempo, podem assim ser classificados:

- a) newtoniano – quando a viscosidade depende apenas da temperatura e, de forma menos significativa, da pressão. Existe uma relação direta entre a taxa de cisalhamento¹² e a tensão de cisalhamento. A constante de proporcionalidade é a viscosidade;

¹²Para Schramm (2006), a taxa de cisalhamento é definida como o gradiente de velocidade de cisalhamento por uma determinada distância.

- b) pseudoplástico – quando a viscosidade aparente¹³ diminui com o aumento da taxa de cisalhamento;
- c) dilatante – quando ocorre aumento da viscosidade aparente com aumento da taxa de cisalhamento;
- d) modelo de Bingham – comportamento como o fluido newtoniano, mas com limite de escoamento, ou seja, necessita de uma tensão mínima de cisalhamento para o início do movimento;
- e) modelo de Herschel-Bulkley – comportamento de um fluido pseudoplástico ou dilatante, também com limite de escoamento.

A Figura 3.4 apresenta os comportamentos para os fluidos acima descritos.

¹³Conforme Tattersall (1991), o termo viscosidade deve ser usado somente para fluidos Newtonianos, no qual a tensão de cisalhamento dividida pela taxa de cisalhamento é constante e denominada viscosidade, para os demais fluidos utiliza-se o termo viscosidade aparente.

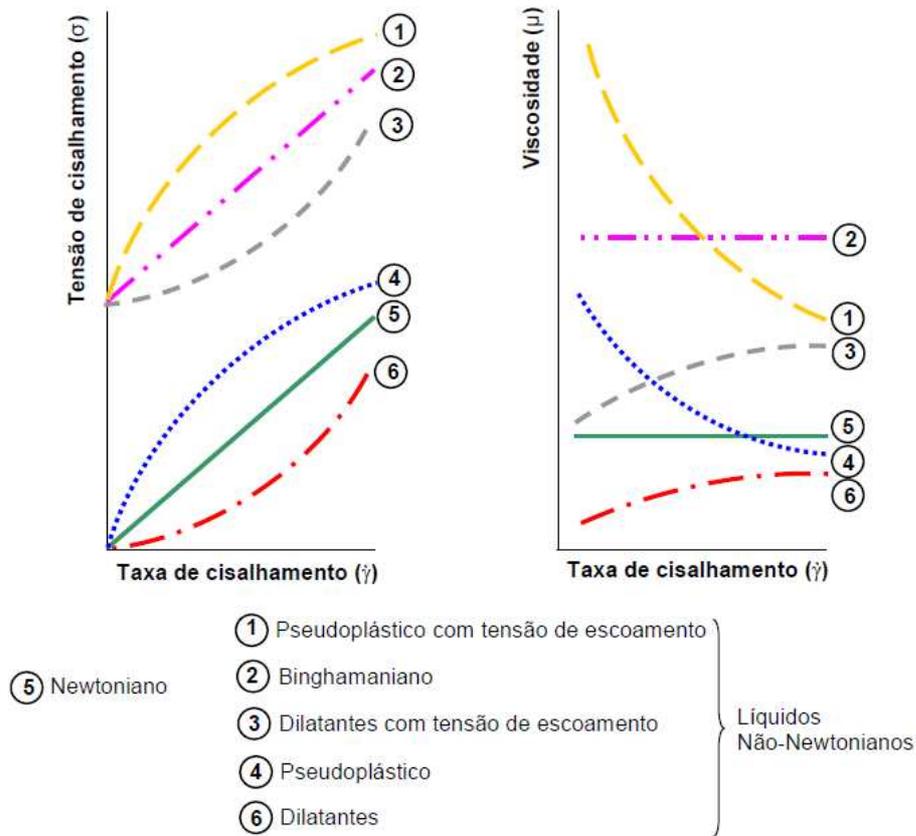


Figura 3.4: Comportamentos de fluxo possíveis para diferentes materiais (Hoppe Filho e Cincotto & Pileggi (apud Alencar, 2008, p.17)).

Flatt (2004) e Tattersall (1991) comparam a reologia do concreto fresco com um comportamento próximo ao modelo de Bingham. Zerbino et al. (2009) comentam que o comportamento do concreto no estado fresco é comumente caracterizado pelo modelo de Bingham ou Herschel-Bulkley.

Para De Larrard et al. (1998), o modelo de Herschel-Bulkley pode ser mais adequado quando comparado com o modelo de Bingham que, muitas vezes, resulta em valores negativos de tensão de escoamento para expressar o comportamento reológico do CAA.

A reologia do concreto é influenciada pelo conteúdo de água; pelo conteúdo, tamanho e distribuição granulométrica dos agregados; e pela distribuição dos finos em conjunto com o SP. Flatt (2004) acrescenta que, através do tempo, a reologia também é influenciada pela hidratação do cimento. Para Shilstone e Shilstone

(1995), a reologia é fortemente influenciada pela combinação das distribuições granulométricas dos agregados.

O CAA é caracterizado por baixíssimos valores de tensão de escoamento, quando comparado com o concreto convencional. Flatt (2004) menciona que, em concretos com baixa tensão de escoamento, a gravidade tende a causar a segregação dos agregados graúdos.

A Figura 3.5 apresenta o comportamento reológico para diferentes tipos de concretos. Segundo Nunes (2001), o CAA apresenta uma tensão de escoamento baixa, próxima de um fluido Newtoniano, e uma viscosidade plástica dependente dos materiais utilizados, principalmente finos, e do tipo de aplicação a que se destina o concreto.

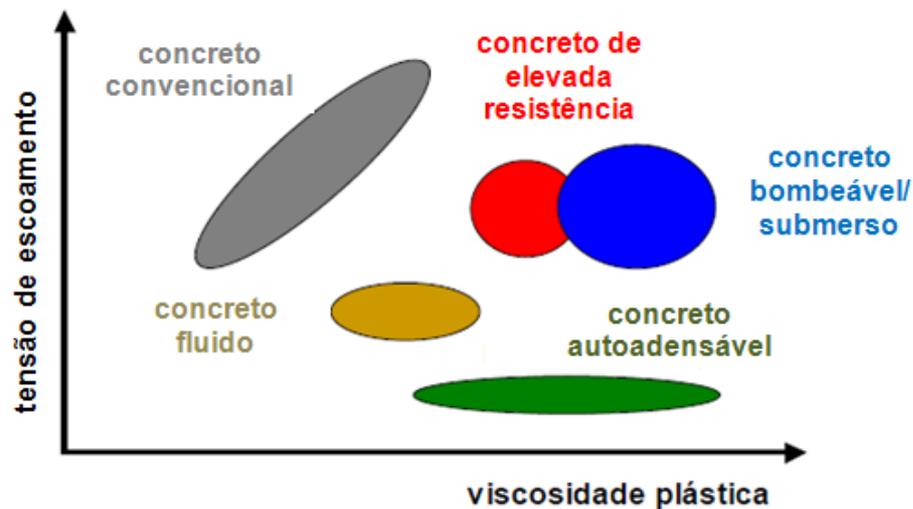


Figura 3.5: Comportamento reológico de diversos tipos de concretos (Nunes, 2001, p.51).

3.4. Trabalhabilidade do concreto fresco

Tattersall (1991) define trabalhabilidade como um termo que se refere às propriedades do concreto fresco, ou seja, antes do início da pega e de seu endurecimento.

Segundo Tattersall (apud Rezende e Djanikian, 1999, p.3), existem três razões práticas importantes para conhecer as propriedades que envolvem a trabalhabilidade do concreto: o estudo de dosagem, o processamento e o controle da mistura.

Tattersall (1991) diz que a trabalhabilidade do concreto é influenciada por diversos fatores, entre eles:

- a) as propriedades do cimento;
- b) o tempo decorrido desde a mistura;
- c) as propriedades dos agregados, em particular, a forma, a distribuição granulométrica, porosidade e textura;
- d) a presença de aditivos plastificantes e SP;
- e) a presença de adições;
- f) a proporção dos constituintes da mistura.

Desta maneira, acrescenta Tattersall (1991), existem diversos fatores a serem considerados, e a situação é mais complicada pelo fato da interação dos fatores acima listados não serem independentes.

Chidiac et al. (apud Castro, 2007, p.56) assinalam que a trabalhabilidade é influenciada pela quantidade e plasticidade da pasta de cimento, e pela quantidade e características dos agregados. Ferraris e Gaidis (apud Castro, 2007, p.99) ressaltam que a pasta de cimento é considerada o lubrificante entre os agregados do concreto e uma mudança na sua fração volumétrica é suficiente para mudar a fluidez da mistura.

Tattersall (1991) explica que o aumento da quantidade de água na mistura resulta no aumento da trabalhabilidade, através da redução da tensão de escoamento e viscosidade plástica. Para o autor, ao contrário do efeito da quantidade de água sobre a trabalhabilidade da mistura, não se pode fazer generalizações quanto aos efeitos da mudança das quantidades de cimento, agregados e finos. Por exemplo, uma mudança na porcentagem de adição de finos

tem um menor efeito em misturas mais ricas do que em misturas mais pobres de cimento. Neville (1997) também exemplifica com a influência das propriedades do agregado sobre a trabalhabilidade que diminui em misturas mais ricas. Desta maneira, a relação entre trabalhabilidade e o proporcionamento de cimento, agregados e finos, necessariamente não é uniforme, podendo haver um valor ótimo na curva, já que, conforme Tattersall (1991), o aumento ou a diminuição da quantidade de um determinado material reduz a trabalhabilidade da mistura.

Na perspectiva de Recena (2011), a trabalhabilidade é função da relação pasta/agregados e da relação argamassa/agregado graúdo. Como comentado anteriormente, no item 3.2.8., o concreto deve apresentar uma quantidade adequada de argamassa para que os vazios deixados pelos grãos do agregado graúdo sejam preenchidos e a argamassa permita o movimento relativo entre os grãos destes agregados. Castro (2007) reitera Recena (2011) ao afirmar que, caso não exista um teor de argamassa adequado, a lubrificação da superfície dos agregados não será suficiente e o concreto apresentará uma trabalhabilidade pobre.

Segundo Maslehuddin et al. (1995) a trabalhabilidade do concreto é sensível ao proporcionamento dos agregados. Conforme a Figura 3.6, que correlaciona agregados graúdos/agregados totais e a trabalhabilidade dos concretos com diferentes consumos de cimento (300-400-480 kg/m³) e mesma relação a/c, verifica-se que, quando ocorre excesso da quantidade de areia nas misturas, o efeito do aumento da superfície desses agregados reduz a trabalhabilidade do concreto. Para misturas com pouca quantidade de areia, também ocorre a queda de trabalhabilidade, contudo a redução do volume de argamassa, aumenta a colisão entre os agregados graúdos. Observa-se também que a ótima relação entre agregados graúdos/agregados totais, exemplificada pela linha AB pontilhada, varia conforme o consumo de cimento.

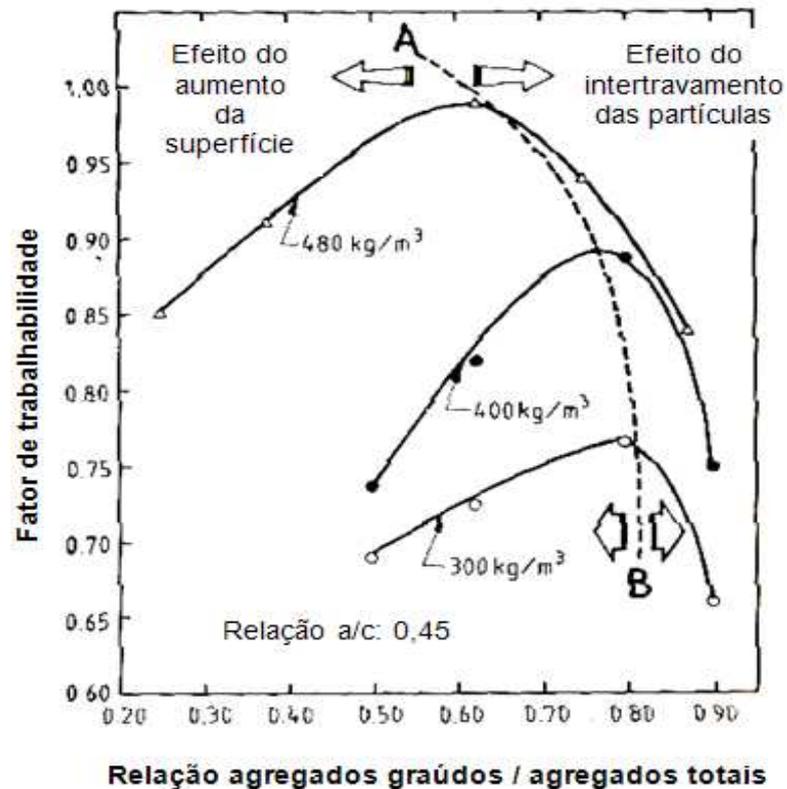


Figura 3.6: Efeito da proporção binária de agregados sobre a trabalhabilidade do concreto (Maslehuddin et al., 1995, p.206).

3.5. Ensaios para avaliação da trabalhabilidade do CAA

Na maioria das vezes, a trabalhabilidade do concreto convencional é avaliada através do ensaio de abatimento do tronco de cone, apesar deste ensaio não mensurar a trabalhabilidade, mas a consistência do concreto, conforme aponta Shilstone e Shilstone (1995). Alencar et al. (2008) afirmam que a avaliação do comportamento do concreto no estado fresco não pode ser atribuída somente ao ensaio de abatimento do tronco de cone em virtude da deficiência na caracterização reológica desse ensaio.

Alencar et al. (2008) e a EFNARC (2002) também esclarecem que as exigências requeridas no comportamento do CAA no estado fresco: capacidade de preencher todos os espaços no interior da fôrma, capacidade de passar através de pequenas aberturas e capacidade de permanecer uniforme e coeso durante o processo de transporte e lançamento, tornaram a caracterização da trabalhabilidade deste concreto uma tarefa mais técnica, quando comparado com um concreto

convencional, avaliando-se de forma qualitativa os parâmetros reológicos do concreto através de ensaios simples¹⁴.

Segundo Tutikian e Dal Molin (2008, p.41):

A trabalhabilidade do CAA no estado fresco é essencial para sua correta aplicação, pois como o adensamento desse concreto independe da ação humana, correções no local não serão possíveis.

Segundo a EFNARC (2002) diferentes tipos de ensaios foram desenvolvidos para avaliar o CAA, conforme Quadro 3.1, contudo não existe apenas um ensaio que avalie as suas três propriedades, e também não existe consenso sobre qual combinação de ensaios é a mais adequada.

Quadro 3.1: Lista de ensaios para medição da trabalhabilidade do CAA (Adaptado da EFNARC, 2002, p.7).

	Ensaio	Propriedade Avaliada
1	Espalhamento	Habilidade de fluir e preencher espaços
2	Espalhamento t_{500}	Habilidade de fluir e preencher espaços
3	Anel Japonês	Habilidade de fluir entre obstáculos
4	Funil V	Habilidade de fluir e preencher espaços
5	Funil V $t_{5\text{minutos}}$	Capacidade de resistir à segregação
6	Caixa L	Habilidade de fluir entre obstáculos
7	Caixa U	Habilidade de fluir entre obstáculos
8	Fill-box	Habilidade de fluir entre obstáculos
9	GTM test	Capacidade de resistir à segregação
10	Orimet	Habilidade de fluir e preencher espaços

¹⁴Ainda que, conforme item 3.3, os ensaios de trabalhabilidade avaliam de maneira muito deficiente os parâmetros reológicos do concreto.

Entretanto, a partir de 2010, foi disponibilizado a ABNT NBR 15823-1, 2010 com o subtítulo “Concreto autoadensável Parte 1: Classificação, controle e aceitação no estado fresco”, que prescreve em seu escopo:

Esta norma estabelece os requisitos para classificação, controle e aceitação do concreto autoadensável no estado fresco, bem como define e estabelece limites para as classes de autoadensabilidade e prescreve os ensaios para verificação das propriedades do concreto autoadensável (CAA).

Segundo a norma, as propriedades requeridas do CAA, para uma dada aplicação, devem ser avaliadas através de quatro parâmetros de ensaios: fluidez e escoamento (SF), viscosidade plástica aparente (VF ou VS), habilidade passante (PL e PJ) e resistência a segregação (SR). Define que a aceitação do CAA no estado fresco deve ser baseada no mínimo na comprovação das propriedades de fluidez e viscosidade plástica aparente, cuja avaliação é feita pelo ensaio de espalhamento e t_{500} , conforme ABNT NBR 15823-2, 2010, e da habilidade passante avaliada pelo ensaio de anel J, conforme a ABNT NBR 15823-3, 2010.

A ABNT NBR 15823-1, 2010 define ainda que, caso seja especificado o ensaio prescrito na ABNT NBR 15823-4, 2010 (método da caixa L) dispensa-se a realização do ensaio do anel J. Se for especificado o ensaio prescrito na ABNT NBR 15823-5, 2010 (método do funil V), dispensa-se a realização do ensaio do tempo de escoamento t_{500} .

Abaixo são apresentadas as Tabelas 3.1, 3.2, 3.3 e 3.4, classificando o CAA em função dos resultados dos ensaios de trabalhabilidade e de sua aplicação conforme adaptação da ABNT NBR 15823-1, 2010, p.9-11.

Tabela 3.1: Classes de espalhamento do CAA em função de sua aplicação (Adaptado da ABNT NBR 15823-1:2010, p.9).

Classe de espalhamento	Espalhamento (mm)	Aplicação
SF1	550 a 650	Estruturas não armadas ou com baixa taxa de armadura e embutidos. Exigência de curta distância de espalhamento horizontal.
SF2	660 a 750	Adequada para a maioria das aplicações correntes.
SF3	760 a 850	Estruturas com alta densidade de armadura ou forma complexa, com uso de agregado graúdo menor que 12,5 mm.

Tabela 3.2: Classes de viscosidade plástica aparente do CAA em função de sua aplicação (Adaptado da ABNT NBR 15823-1:2010, p.10).

Classe de viscosidade plástica aparente	Tempo (s)	Aplicação
VS1 / VF1	$t_{500} \leq 2$ e funil V ≤ 8	Estruturas com alta densidade de armadura e embutidos, mas com exigência de controle de exsudação e segregação.
VS2 / VF2	$t_{500} > 2$ e funil V entre 9 e 25	Adequada para a maioria das aplicações correntes. Efeito tixotrópico ¹⁵ , menor pressão das fôrmas, e melhor resistência à segregação. Efeito negativo no aprisionamento de ar e preenchimento de cantos.

¹⁵Oliveira (2007) afirma que materiais tixotrópicos apresentam diminuição da viscosidade com o tempo de aplicação da tensão de cisalhamento, havendo um aumento da viscosidade quando a tensão é retirada.

Tabela 3.3: Classes de habilidade passante do CAA em função de sua aplicação (Adaptado da ABNT NBR 15823-1:2010, p.10).

Classe de habilidade passante	Resultado do Anel J (mm) e da Caixa L (H2/H1)	Aplicação
PL1 / PJ1	Anel J: 25 a 50 (com 16 barras de aço) Caixa L: (H2/H1) \geq 0,80 (com duas barras de aço)	Adequada para elementos estruturais com espaçamentos de armadura de 80 a 100 mm.
PL2 / PJ2	Anel J: 0 a 25 (com 16 barras de aço) Caixa L: (H2/H1) \geq 0,80 (com três barras de aço)	Adequada para a maioria das aplicações correntes. Elementos estruturais com espaçamentos de armadura de 60 a 80 mm.

Tabela 3.4: Classes de resistência à segregação do CAA em função de sua aplicação (Adaptado da ABNT NBR 15823-1:2010, p.11).

Classe de resistência à segregação	Coluna de segregação (%)	Aplicação
SR1	\leq 20, distância a ser percorrida pelo concreto menor que 5 m	Espaçamento entre armaduras > 80 mm.
SR2	\leq 15, distância a ser percorrida pelo concreto maior que 5 m	Espaçamento entre armaduras > 80 mm.
	\leq 15, distância a ser percorrida pelo concreto menor que 5 m	Espaçamento entre armaduras < 80 mm

No presente trabalho foram utilizados cinco ensaios: espalhamento, t_{500} , funil V, caixa L e coluna de segregação. Os ensaios foram escolhidos conforme recomendação da ABNT NBR 15823-1, 2010 e estão descritos a seguir. O ensaio anel J não foi comentado nos itens seguintes e é detalhado na ANBT NBR 15823-3, 2010: “Concreto autoadensável Parte 3: Determinação da habilidade passante – Método do anel J”.

3.5.1. Método do cone de Abrams: ensaio de espalhamento e tempo de escoamento (t_{500})

A EFNARC (2002) esclarece que a determinação do espalhamento é usada para avaliar o desempenho do fluxo horizontal do CAA sem a existência de obstruções. Inicialmente, desenvolvido no Japão para a avaliação de concretos submersos, é baseado no ensaio de abatimento do tronco de cone. O diâmetro do círculo do concreto gerado, após a retirada do tronco de cone, é usado na mensuração da fluidez do CAA.

Segundo Gomes e Barros (2009), para execução do ensaio de espalhamento, são necessários os seguintes equipamentos:

- base quadrada reta, lisa e de material sólido, com dimensões de, no mínimo, 90cm;
- cone de Abrams;
- uma colher tipo concha;
- um cronômetro;
- uma trena de no mínimo 90 cm.

As orientações da EFNARC (2002) para a execução do ensaio é simples: a base quadrada deve estar nivelada e são necessários aproximadamente 6 litros de concreto. O ordenamento segue os seguintes passos: primeiramente, marcar sobre a base quadrada dois círculos, um com 200 mm e outro com 500 mm, posicionar o tronco de cone no círculo de 200 mm e segurar firme para evitar vazamentos. Preencher o cone de Abrams com concreto sem adensar e levantar o tronco de cone perpendicularmente à placa, em um movimento, permitindo o CAA fluir livremente. Simultaneamente ao início do levantamento do cone, acionar o cronômetro e parar a contagem quando o CAA atingir a marca de 500 mm (este tempo é chamado de tempo de escoamento t_{500}). Quando o espalhamento do concreto cessar, mede-se dois diâmetros perpendiculares e calcula-se a média de espalhamento (D_{final}). A Figura 3.7 ilustra as dimensões e posições de medição do ensaio.

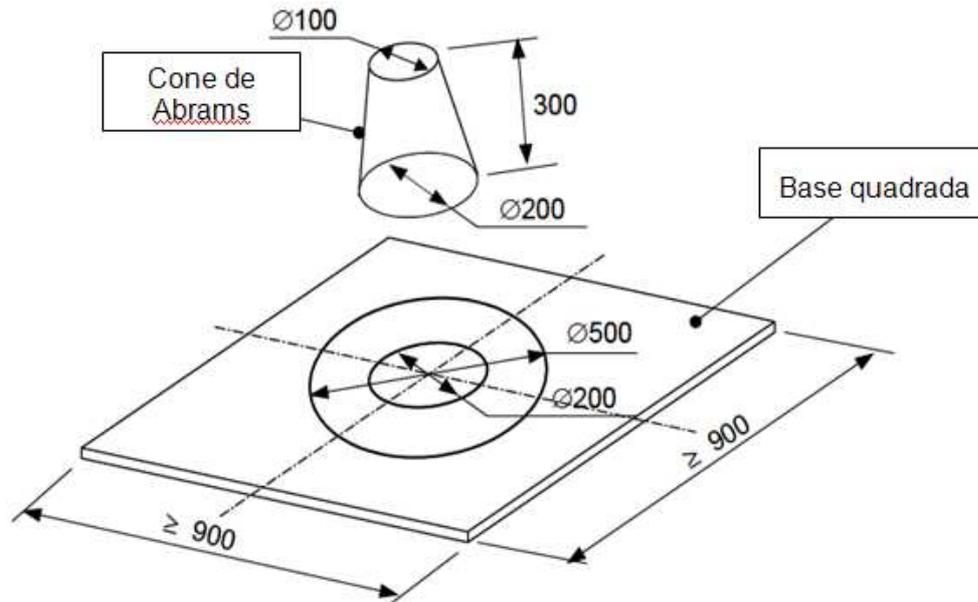


Figura 3.7: Dimensões, em milímetros, dos equipamentos do ensaio e posições para medir o resultado de espalhamento e t_{500} (Guidelines for testing fresh self-compacting concrete, 2005, p.6).

3.5.2. Método da coluna de segregação

O ensaio determina a resistência à segregação do CAA pela diferença das massas de agregado graúdo existentes no topo e na base da coluna de segregação. A coluna constitui-se de um tubo de PVC, de diâmetro nominal de 200 mm e 660 mm de altura total, dividido em três seções. A parte do topo e da base devem ter alturas de 165 mm e a parte central deve ter altura de 330 mm. As três partes devem ser unidas de maneira que não ocorra vazamento de concreto durante a execução do ensaio (ABNT NBR 15823-6, 2010). A Figura 3.8 detalha as dimensões do tubo para a realização do ensaio.

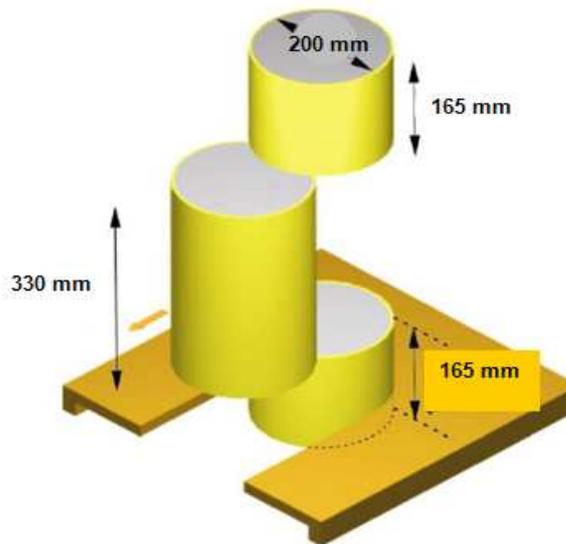


Figura 3.8: Desenho esquemático do ensaio coluna de segregação, dimensões em milímetros (Alencar, 2008, p.37).

O tempo de preenchimento da coluna não deve ser superior a 5 minutos e, aproximadamente 20 minutos após a moldagem, devem ser retiradas as porções de concreto do topo e da base, procedendo a lavagem e peneiramento (com abertura da malha de 5 mm) da mistura de forma a remover totalmente a argamassa, permanecendo somente os agregados graúdos. Esses são pesados, obtendo-se as massas m_B e m_T para cada amostra (ABNT NBR 15823-6, 2010).

Segundo a ABNT NBR 15823-6, 2010, a porcentagem de segregação é calculada através da Equação 3.1, onde:

SR: resistência à segregação (%);

m_B : massa do agregado graúdo obtido na porção de concreto retirada da base da coluna (em gramas);

m_T : massa do agregado graúdo obtido na porção de concreto retirada do topo da coluna (em gramas).

$$SR = 2 \times \frac{(m_B - m_T)}{(m_B + m_T)} \times 100 \quad (3.1)$$

A segregação avaliada por este ensaio é classificada como estática, já que conforme Bethmont et al. (2009), a segregação é definida como estática quando ocorre após o concreto fresco ter sido lançado nas fôrmas e, dinâmica, quando esta ocorre durante o lançamento.

3.5.3. Método da caixa L

Segundo Tutikian e Dal Molin (2008, p.54):

O ensaio do I-box test¹⁶ mede a fluidez do concreto simultaneamente à sua capacidade de passar por obstáculos e permanecer coeso. O equipamento consiste em uma caixa na forma de 'L' com porta móvel separando a parte horizontal e, junto com a divisória, barras de aço que simulam a armadura real da estrutura, criando um obstáculo à passagem do concreto.

Para a EFNARC (2002), o diâmetro das barras de aço e o espaçamento entre elas também devem refletir a situação encontrada na armadura de projeto.

A caixa L é colocada em uma posição estável e nivelada, seu interior é umedecido e o trecho vertical é preenchido com a amostra de CAA. Após aproximadamente 30 segundos, levanta-se a porta deslizante e deixa-se o concreto fluir. Quando o concreto cessa o movimento, é medida a altura do concreto no final do trecho horizontal (H_2) e a altura do concreto remanescente do trecho vertical (H_1). Gomes e Barros (2009) esclarecem que a relação de bloqueio (RB) é o valor da altura do concreto do trecho (H_2) dividido pela altura do trecho (H_1), conforme

¹⁶L-box teste é o termo em inglês do ensaio ou método da caixa L.

Equação 3.2, e deve ser $\geq 0,8$. A Figura 3.9 ilustra as dimensões, em milímetros, da caixa L.

$$RB = \left(\frac{H_2}{H_1} \right) \quad (3.2)$$

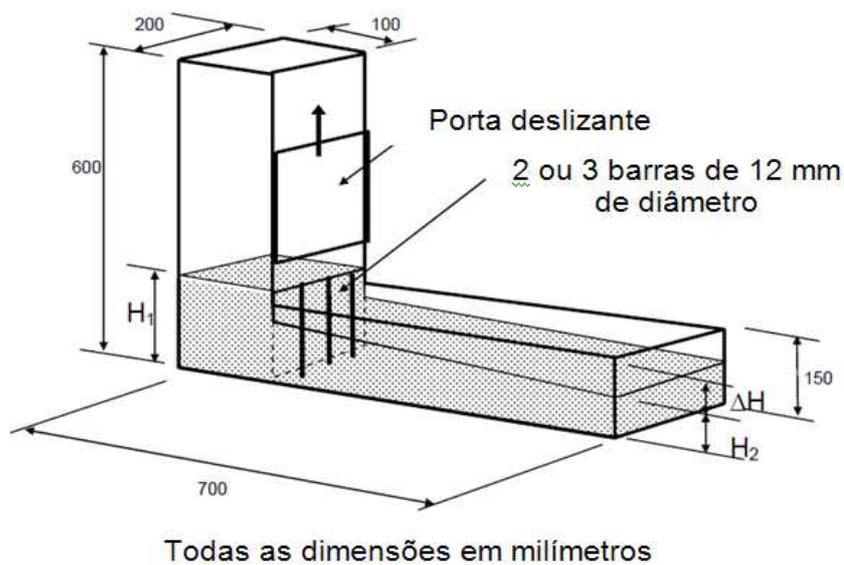


Figura 3.9: Dimensões básicas em milímetros do ensaio caixa L (EFNARC, 2005, p.54).

3.5.4. Método do funil V

Segundo Gomes e Barros (2009) e pesquisas da EFNARC (2002), o ensaio do funil V foi desenvolvido para simular a capacidade de passagem do CAA através do estreitamento de uma seção, apenas sob a ação de seu próprio peso. O ensaio do funil V mede a fluidez do concreto e também é utilizado para verificar a presença de segregação, quando o concreto é impedido de escorrer pela saída do funil. O teste consiste em medir o tempo de que a amostra necessita para fluir totalmente através do orifício inferior do funil.

Contudo, a ABNT NBR 15823-5, 2010 prescreve o ensaio para determinação da viscosidade plástica aparente do CAA. Estabelece, ainda, que o funil V deve ser preenchido em tempo não superior a 5 minutos após sua coleta, e a abertura da

comporta deve ser realizada em um tempo não superior a 30 segundos, após o final de seu preenchimento. O cronômetro deve ser acionado simultaneamente à abertura da comporta e parado quando todo o concreto houver escoado. As dimensões básicas, em milímetros, do equipamento são apresentadas na Figura 3.10.

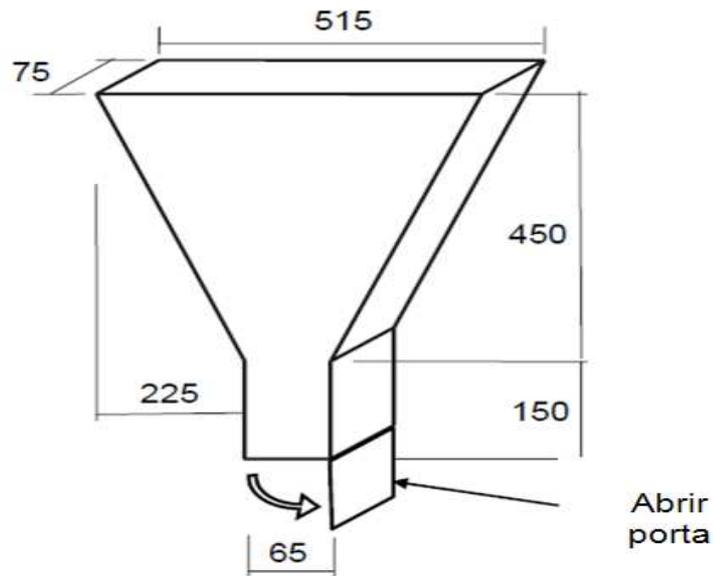


Figura 3.10: Dimensões básicas em milímetros do funil V (EFNARC, 2005, p.51).

3.6. Métodos de dosagem para a obtenção do CAA

3.6.1. Método de dosagem de Díaz

Segundo Dafico (1997), o método de dosagem de concreto de elevado desempenho de Díaz tem como fundamentos básicos:

- a) a resistência do concreto depende da resistência do cimento, da forma do agregado graúdo e da relação a/c;
- b) a consistência do concreto depende do volume de água disponível por unidade de volume de vazios deixado pelo agregado graúdo que, por sua vez, depende da forma do agregado;
- c) o teor de argamassa ideal é aquela que resulta na menor porcentagem de vazios da mistura entre brita e areia.

De acordo com Díaz (1998), o método de dosagem de concreto de elevado desempenho segue, de maneira resumida, as seguintes etapas:

- a) determinação por método experimental da relação ótima dos agregados graúdos e miúdos;
- b) determinação da característica "A" do agregado graúdo através de equações e tabelas fornecidas pelo método, e de mistura teste, onde são levantados o volume de água utilizado, e os resultados de resistência à compressão do cimento e do concreto. Também pode-se determinar o "A" por método físico-matemático, conforme procedimento descrito no método de dosagem de Díaz (1998);
- c) com a característica "A" do agregado graúdo e as equações e tabelas fornecidas pelo método, pode-se calcular o traço do concreto conforme abatimento e resistência à compressão desejada.

Como cuidados importantes na aplicação do método de dosagem, Díaz (1998, p.37) recomenda que:

não se pode aplicar mecanicamente a regra da porcentagem mínima de vazios nas misturas dos agregados, mas deve-se levar em conta os outros fatores não menos importantes, que influenciam na qualidade do concreto.

O autor (1998, p.31) também esclarece:

com o aumento dos agregados de menor dimensão, cresce também a superfície específica da mistura dos agregados e aumenta a quantidade de pasta de cimento requerida para envolver a superfície total das partículas.

3.6.2. Modelo de Empacotamento Compressível (MEC)

Formagini (2005) apresenta o modelo de empacotamento compressível, desenvolvido por François de Larrard. É uma ferramenta de dosagem que possibilita a seleção e combinação dos constituintes do concreto de maneira a aumentar a compacidade da mistura granular e reduzir a possibilidade de segregação.

3.6.2.1. Empacotamento virtual de uma mistura granular

Segundo Miranda (2008), Formagini (2005) e Silva (2004), pode-se realizar analogia do empacotamento virtual de uma mistura granular com a teoria de cálculo do fator de empacotamento atômico (FEA) de uma estrutura cristalina cúbica. Segundo Callister (2000), o FEA é o quociente do volume de átomos em uma célula unitária pelo volume total da célula unitária. Uma estrutura cúbica de corpo centrado (CCC) apresenta fator de empacotamento de 0,68; uma estrutura cúbica de faces centradas (CFC) tem como fator de empacotamento 0,74. A estrutura CFC apresenta um menor volume de espaços entre átomos ou um empacotamento maior do que uma estrutura CCC. As Figuras 3.11 e 3.12 representam uma estrutura CFC e CCC, respectivamente.

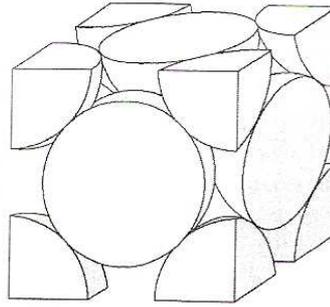


Figura 3.11: Estrutura cristalina de faces centradas (CFC) (Callister, 2002, p.22).

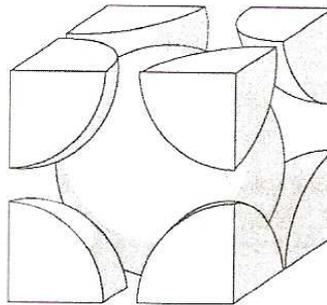


Figura 3.12: Estrutura cristalina de corpo centrado (CCC) (Callister, 2002, p.23).

3.6.2.2. Mistura binária sem interação

O primeiro conceito importante no MEC é a identificação da classe de grão dominante. A partir de uma mistura binária, onde d_1 é muito maior do que d_2 ($d_1 \gg d_2$), d_1 é a classe 1 e d_2 é a classe 2, pode-se ter os seguintes arranjos, conforme Figura 3.13:

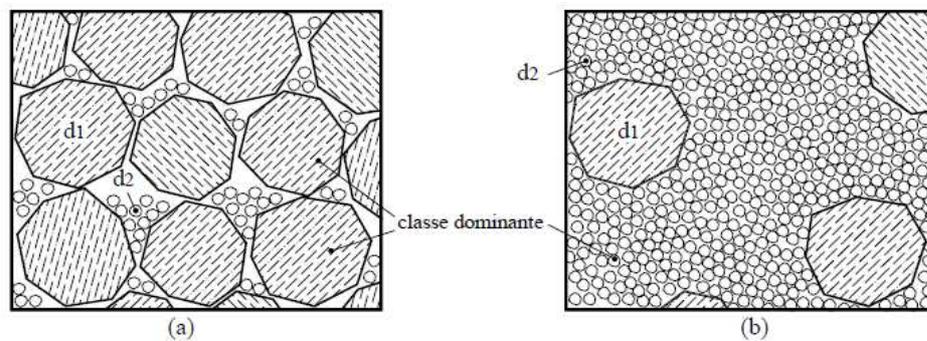


Figura 3.13: Mistura binária sem interação: (a) classe 1 dominante; (b) classe 2 dominante (Formagini, 2005, p.17).

A Figura 3.14 ilustra a evolução de compacidade (γ) em função da proporção de grãos finos (y_2) de uma mistura binária sem interação. Em $y_2=0$, a quantidade de grãos finos é igual a zero, formada por somente grãos graúdos, a compacidade da mistura é igual a β_1 . Com a adição e o posterior aumento da quantidade de grãos finos, chega-se no ponto em que todos os espaços entre grãos grosseiros estão preenchidos na mistura, e a compacidade é máxima. A partir deste ponto, a adição de grãos finos gera a retirada de grãos grosseiros, ocorrendo a redução de compacidade até atingir a situação em que a mistura é composta somente por grãos finos ($y_2=1$) e a compacidade é igual a β_2 .

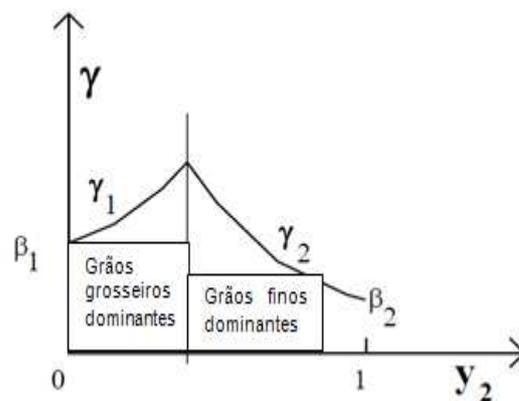


Figura 3.14: Evolução de compacidade em função da proporção de grãos finos em uma mistura binária sem interação (De Larrard, 1999, p.36).

3.6.2.3. Mistura binária com interação total

Segundo De Larrard (1999), a interação total entre duas classes de grãos ocorre quando o diâmetro d_1 é igual ao diâmetro d_2 ($d_1 = d_2$). Para Tutikian (2007), nesta interação, o pacote granular pouco varia com a compacidade ou com a fração de cada uma das classes de grãos.

3.6.2.4. Mistura binária com interação parcial

Formagini (2005) afirma que, quando a diferença entre os diâmetros d_1 e d_2 de um sistema binário não é muito grande, efeitos de parede e afastamento podem ocorrer na mistura. Miranda (2008) esclarece que o efeito de parede ocorre quando

os grãos maiores estão rodeados por grãos menores e a porosidade desta interface é maior do que no restante do volume. A Figura 3.15 ilustra este fenômeno.

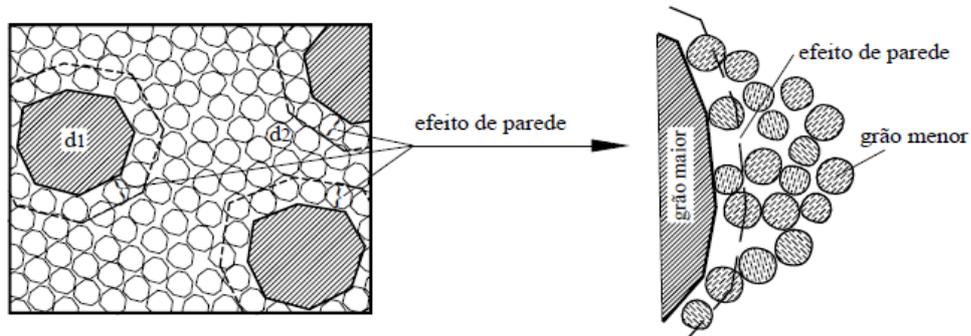


Figura 3.15: Mistura binária com interação parcial: efeito parede (Formagini, 2005, p.21).

O efeito de afastamento ocorre quando grãos finos são inseridos nos espaços vazios de uma mistura de grãos grosseiros dominantes. Miranda (2008) apresenta como resultado desse efeito, o afastamento e a redução de grãos grosseiros em um determinado volume. A Figura 3.16 ilustra este fenômeno.

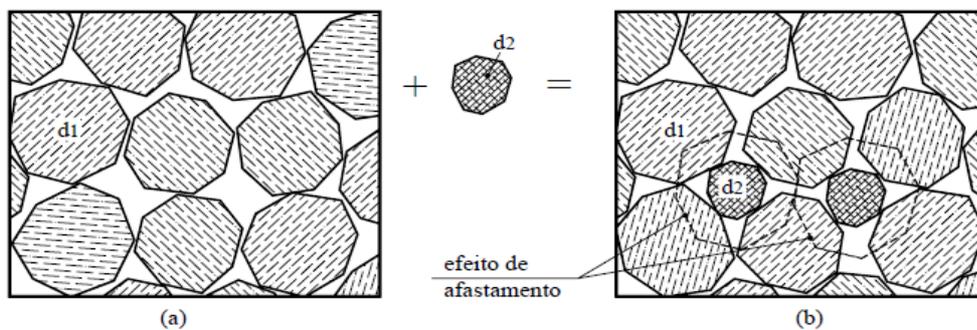


Figura 3.16: Mistura binária com interação parcial: (a) mistura sem perturbação, (b) efeito de afastamento exercido pelo grão de diâmetro menor sobre o grão de diâmetro maior (Formagini, 2005, p.20).

De Larrard (1999) explica que, quanto menor o nível de interação de um sistema binário, maior será a compactação da mistura. A Figura 3.17 mostra essa interação.

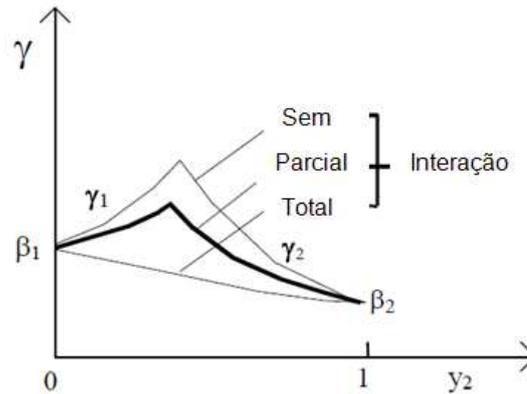


Figura 3.17: Evolução da compacidade de um sistema binário em função da proporção de grãos finos. Caso geral (De Larrard, 1999, p.39).

3.6.3. Comentários sobre o proporcionamento dos agregados

Técnicas para aumentar a compacidade de misturas granulares, através do empacotamento das partículas, são utilizadas desde o século XIX. Helene e Terzian (1992) historicizam que, em 1828, na França, Louis J. Vicat verificou a influência da compacidade sobre a resistência dos conglomerados. René Ferét, em 1892, no mesmo país, relaciona a resistência da argamassa com sua compacidade. Préaudeau, em 1881, propõe a determinação de vazios da areia e da pedra, e que o volume da pasta e argamassa seja definido a partir da correção do volume de vazios encontrado em cada agregado. Em 1901, o americano William B. Fuller verificou, experimentalmente, que, a partir de determinadas curvas granulométricas, obtinham-se concretos de máxima resistência à compressão e compacidade. Posteriormente, junto com Sanford E. Thompson, em 1907, Fuller estabelece uma série de regras para o proporcionamento dos materiais. No Brasil, conforme Petrucci (1998), também são desenvolvidos estudos para determinação de curvas granulométricas ideais, para agregados com determinadas características da região do Rio de Janeiro, através dos trabalhos de Lobo Carneiro. Segundo Lobo Carneiro (apud Boggio, 2000, p.74) essas curvas granulométricas, também chamadas de “ótimas”, permitem obter uma mistura de concreto de máxima compacidade.

Liborio et al. (2009) discorrem que modelos teóricos como o de Furnas, Alfred e Andreasen, que determinam a distribuição granulométrica para a maior densidade

do material particulado, também são desenvolvidos com o intuito de obtenção de máximo empacotamento de partículas.

Silva (2004) observa que diversos autores propõem distintas curvas de proporcionamento de materiais, o que levanta dúvidas quanto à solidez destes métodos. Gomes e Barros (2009) e Silva (2004) relatam que, em 1999, De Larrard apresenta o modelo científico MEC que, aparentemente, soluciona o problema de empacotamento de mistura seca.

Verifica-se também que a aplicação dos conceitos de empacotamento de partículas não se restringe a um determinado tipo de concreto. Ao contrário, Gomes e Barros (2009), Liborio et al. (2009), Tutikian (2009), Formagini (2005), Silva (2004), Díaz (1998) e Helene e Terzian (1992) demonstram que tal conceito é amplamente utilizado na formação de concretos de resistência normal, fluidos, autoadensáveis e de alto desempenho.

Koehler e Fowler (2007) avaliam que a grande maioria dos métodos de dosagem de CAAs utilizam técnicas de proporcionamento de agregados com intuito de reduzir o volume de vazios entre os agregados. Acrescentam, ainda, que essas técnicas de proporção variam para cada método de dosagem.

Os estudos do cubano Vitervo O'Reilly Díaz também buscaram analisar o empacotamento de partículas, através da relação ótima da mistura areia e agregado graúdo. Díaz (1998) assume que, utilizando seu método experimental de proporcionamento ótimo, a mistura resultante apresentará maior compacidade e menor consumo de cimento e, assim, maior resistência à difusão de elementos agressivos na estrutura de concreto.

Contudo, o próprio estudo de Díaz (1998) verifica, muitas vezes, melhores resultados de resistência à compressão, em combinações de partículas que não apresentam o menor índice de vazios. Na pesquisa de Melo (2005), o CAA dosado com o maior valor de compacidade de agregados graúdos não apresentou coesão e trabalhabilidade adequada para sua utilização. Pereira (2010) também priorizou a

utilização de um maior volume de brita 0, em substituição à brita 1, na fração de agregados graúdos, abrindo mão da combinação de agregados graúdos com menor índice de vazios, e empregando a combinação com melhor trabalhabilidade. Para Koehler e Fowler (2007), no CAA, a combinação de agregados com menor índice de vazios pode não resultar na combinação com melhor trabalhabilidade.

3.6.4. Método de dosagem de concreto convencional do IPT/EPUSP de Helene e Terzian (1992)

Boggio (2000) explica que este método de dosagem de concreto convencional é o resultado da criatividade de pesquisadores brasileiros que necessitavam enfrentar uma realidade nacional com uma enorme diversidade de materiais regionais empregados na produção de concretos, com exigências de trabalhabilidade, resistência e durabilidade muito variadas.

O método do IPT/EPUSP utiliza três “leis de comportamento” que são relacionadas por um diagrama de dosagem graficado sobre três quadrantes, conforme ilustrado na Figura 3.18. Define que a consistência do concreto fresco depende da forma e composição granulométrica do agregado graúdo e da consistência da argamassa. A consistência da argamassa, por sua vez, está condicionada pela forma e granulometria do agregado miúdo e pela consistência da pasta, que depende da relação a/c .

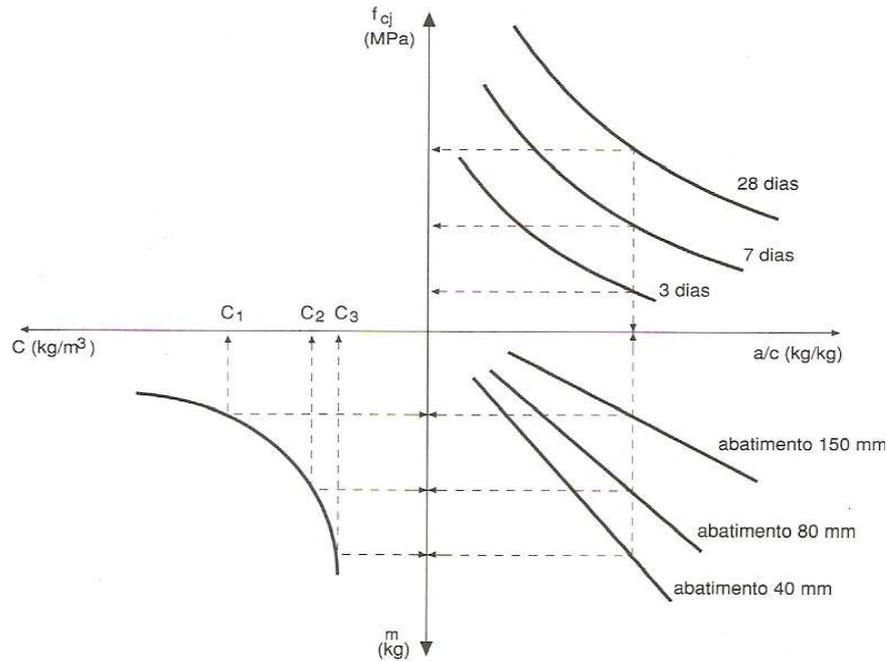


Figura 3.18: Diagrama de dosagem (Helene e Terzian, 1992, p.233).

O método prevê a busca do teor ideal de argamassa seca, através de estudo experimental de um traço intermediário (1:m), que será utilizado para todos os traços-base previstos (1:m-x, 1:m, 1:m+x). A determinação do teor ideal de argamassa seca é realizado por meio de observações visuais da mistura, combinadas com manuseio do concreto com a colher de pedreiro para verificar o aspecto de trabalhabilidade e acabamento, além da realização do ensaio de abatimento pelo tronco de cone, para visualização da coesão do concreto fresco.

Além do teor de argamassa seca, elegido para um certo abatimento e que será constante, todos os traços-base de uma mesma família apresentam a relação, em massa, água/materiais secos (H), aproximadamente constante.

Abaixo seguem as chamadas “leis de comportamento” e as Equações 3.3, 3.4 e 3.5 que correlacionam essas leis para construção do diagrama de dosagem, segundo Helene e Terzian (1992):

a) Lei de Abrams

$$f_{cj} = \frac{k_1}{(k_2^{a/c})} \quad (3.3)$$

b) Lei de Lyse

$$m = k_3 + k_4 \times a/c \quad (3.4)$$

c) Lei de Molinari

$$C = \frac{1000}{(k_5 + k_6 \times a/c)} \quad (3.5)$$

Onde:

f_{cj} : resistência à compressão axial, à idade j , em MPa;

a/c : relação água/cimento em massa, em kg/kg;

$k_1, k_2, k_3, k_4, k_5, k_6$: constantes que dependem exclusivamente dos materiais (cimentos, agregados e aditivos);

m : relação agregados secos/cimento, em kg/kg;

C : consumo de cimento por metro cúbico de concreto adensado, em kg/m³.

3.6.5. Proporções necessárias para obter o CAA – Método Okamura et al.

Para Okamura e Ouchi (2003), a metodologia para alcançar o CAA envolve não somente alta deformabilidade da argamassa, mas também resistência à segregação entre o agregado graúdo e a argamassa, quando este flui nas zonas confinadas das fôrmas e entre a armadura.

Os autores comparam o CAA com o concreto convencional em termos de composição. Verificam, principalmente, conforme a Figura 3.19, diferenças no

volume de agregado graúdo e na presença de finos. O CAA utiliza um volume menor de agregado graúdo, um volume maior de finos, além do SP.

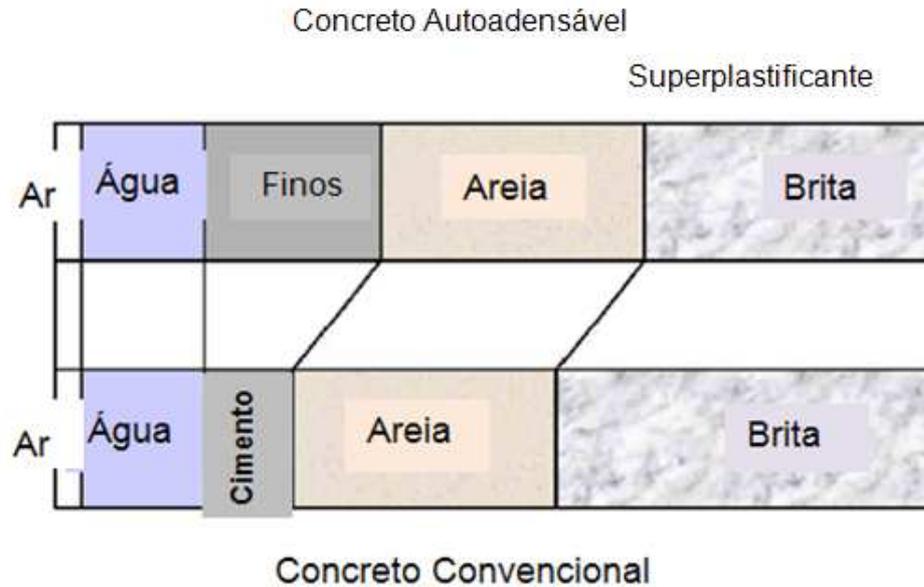


Figura 3.19: Comparação entre o proporcionalamento do CAA e o do concreto convencional (Okamura e Ouchi, 2003, p.5).

Okamura e Ozawa (apud Okamura e Ouchi, 2003, p.6) empregaram a seguinte metodologia para obter o CAA:

- a) limitada quantidade de agregado;
- b) baixa relação a/f ;
- c) utilização de SP.

A Figura 3.20 ilustra a metodologia utilizada por Okamura e Ozawa (apud Okamura e Ouchi, 2003, p.6). A composição do CAA deve ter volume de agregado graúdo limitado em 50% do total do volume do concreto, argamassa com volume de areia limitado em 40% do volume total da argamassa, alta dosagem de SP e baixa relação a/f .

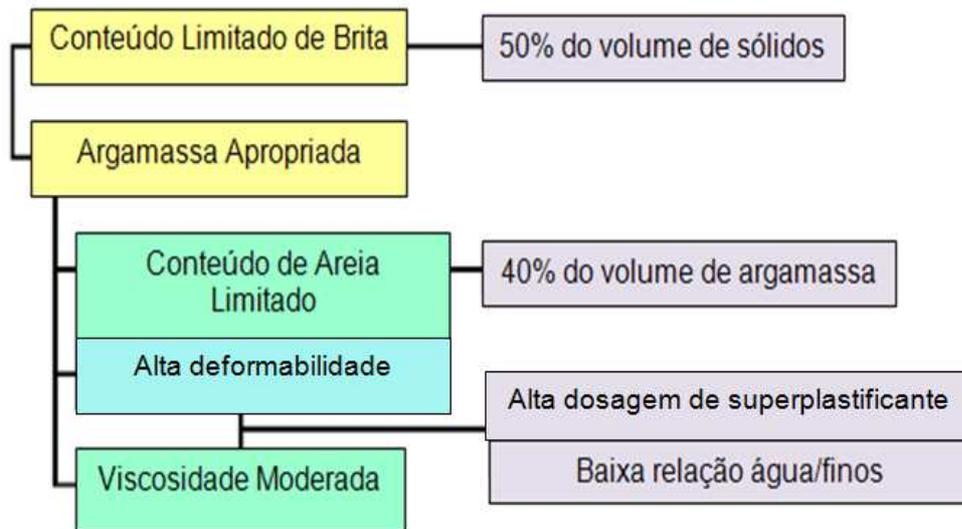


Figura 3.20: Metodologia para obter o CAA (Okamura e Ozawa (apud Okamura e Ouchi, 2003, p.6)).

Segundo Bennenk (apud Alencar, 2008, p.52), a obtenção do CAA, pelo método de Okamura et al, envolve a caracterização dos materiais através de ensaios de trabalhabilidade da pasta, avaliação da argamassa através do ensaio de miniabatimento e funil V para argamassa, e, por fim, avaliação do concreto através do ensaio da caixa U, espalhamento e funil V.

Para Gomes e Barros (2009), o método de Okamura et al. parte da determinação da composição da argamassa, delimitando o volume de agregado miúdo e da atribuição de valores para as relações superplastificante/materiais finos (SP/f) e água/materiais finos (V_a/V_f), em volume, através de ensaios na argamassa, nos quais as propriedades de alta fluidez e moderada viscosidade exigidas para a argamassa são alcançadas, variando a dosagem de SP e a relação água/materiais finos.

Ensaio para avaliação da fluidez e viscosidade da argamassa foram caracterizados através dos resultados de T_m e R_m , respectivamente. Okamura e Ouchi (2003) ilustram que um valor alto de T_m indica maior deformabilidade e um baixo valor de R_m indica maior viscosidade da argamassa. As Figuras 3.21 e 3.22 ilustram as dimensões dos equipamentos para os ensaios de argamassa. As Equações 3.6 e 3.7 são as utilizadas, respectivamente, para o cálculo de T_m e R_m .

$$T_m = \frac{(d_3 \times d_4 - d_0^2)}{d_0^2} \quad (3.6)$$

Onde:

d_3 e d_4 : medidas do diâmetro do espalhamento da argamassa;

d_0 : diâmetro da base do tronco de cone.

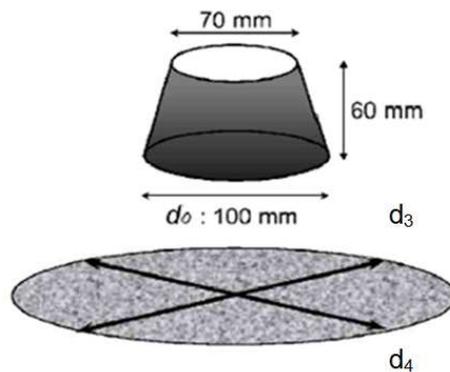


Figura 3.21: Ensaio de espalhamento de argamassa (Okamura e Ouchi, 2003, p.7).

$$R_m = \frac{10}{t_1} \quad (3.7)$$

Onde:

t_1 : tempo em segundos para a argamassa fluir através do funil.

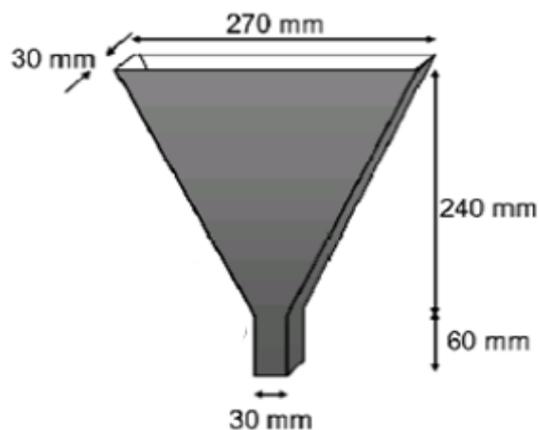


Figura 3.22: Ensaio funil V de argamassa (Okamura e Ouchi, 2003, p.7).

Argamassas com valores de $T_m = 5$ e $R_m = 1$ são consideradas aceitáveis para obter concretos com propriedades autoadensáveis, conforme Takada et al. (apud Gomes e Barros, 2009, p.71). A Figura 3.23 ilustra a relação entre estas duas variáveis e o nível de autoadensabilidade, as faixas de T_m e R_m , em que o concreto é classificado como autoadensável (T_m com resultados entre 2,5 - 6 e R_m com resultados entre 0,75 - 1,25) e a relação dessas faixas de resultados com o grau de autoadensabilidade do concreto. O maior grau de autoadensabilidade encontra-se identificado pelo círculo preto AA e o menor grau pelo círculo amarelo B.

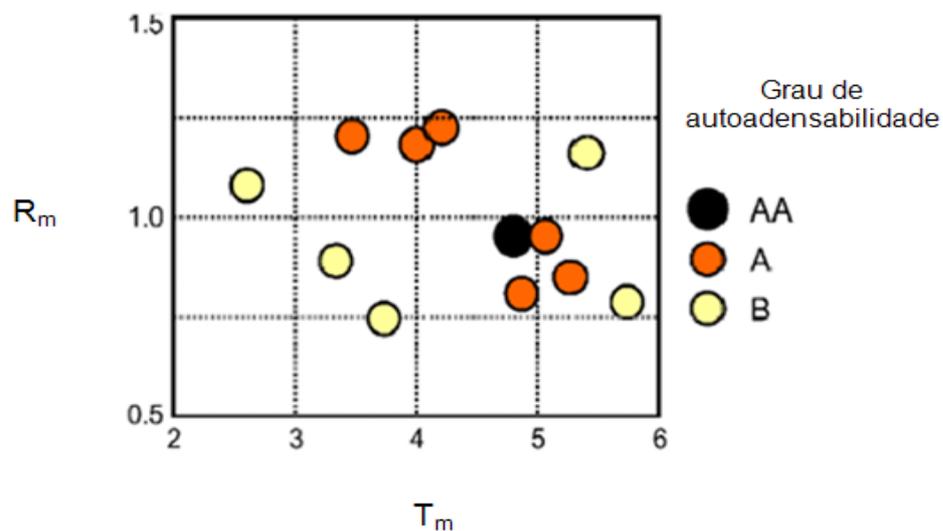


Figura 3.23: Relação entre os resultados de T_m e R_m da argamassa e o grau de autoadensabilidade do concreto. O círculo preto AA define o maior grau de autoadensabilidade, seguido pelo círculo laranja A e o círculo amarelo B de menor autoadensabilidade (Okamura e Ouchi, 2003, p.8).

Após a dosagem da argamassa e adição limitada de agregado graúdo, a verificação da autoadensabilidade do concreto é realizada através do ensaio da caixa U^{17} , espalhamento e funil V. Okamura e Ouchi (2003) determinam que, quando a altura H (mostrada na Figura 3.24) for menor de 300 mm, significa que o

concreto não é autoadensável, e ajustes na mistura devem ser realizados e mensurados através dos ensaios funil V e espalhamento para concreto. As Equações 3.8 e 3.9 são utilizadas, respectivamente, para o cálculo das variáveis T_c , no ensaio de espalhamento, e R_c no ensaio funil V.

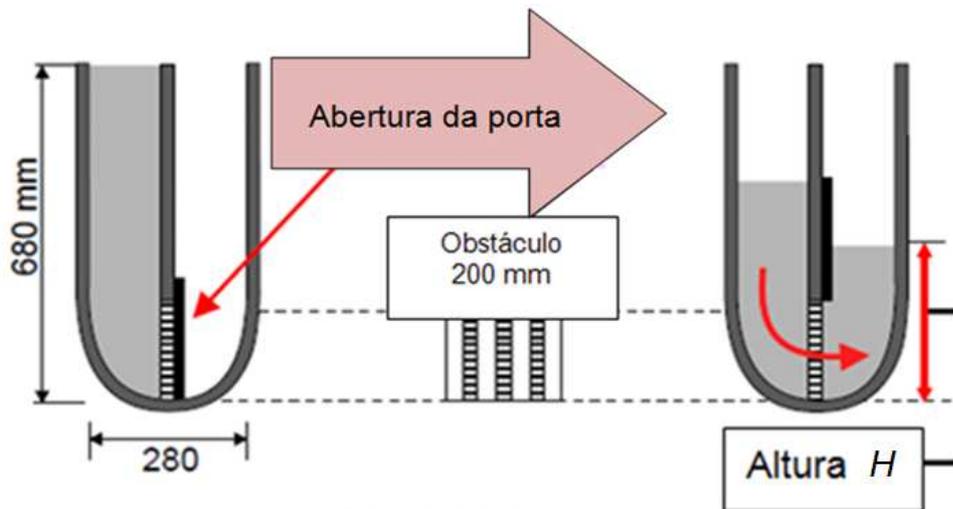


Figura 3.24: Ensaio caixa U (Okamura e Ouchi, 2003, p.7).

$$T_c = \frac{(Sfl_1 \times Sfl_2 - Sfl_0^2)}{Sfl_0^2} \quad (3.8)$$

Onde:

Sfl_1 e Sfl_2 : medidas do diâmetro do espalhamento do concreto;

Sfl_0 : diâmetro da base do tronco de cone.

¹⁷Este ensaio não foi discutido na dissertação mas é detalhado nos trabalhos de Gomes e Barros (2009) e Tutikian e Dal Molin (2008).

$$R_c = \frac{10}{t_2} \quad (3.9)$$

Onde:

t_2 : tempo em segundos para o concreto fluir através do funil.

Sendo T_c a deformabilidade do concreto e R_c a viscosidade do concreto.

O método de dosagem de Okamura et al. é identificado como o primeiro método para obtenção do CAA, conforme dados de Sedran e De Larrard (apud Gomes e Barros, 2009, p.69). Segundo Gomes e Barros (2009), a partir do primeiro protótipo do CAA, surgiram outros métodos de dosagem: Peterson et al, Modelo de empacotamento Compressível, Su et al, Saak et al, Repette-Melo, Tutikian e Tutikian e Dal Molin, EFNARC e Gomes et al.

Neste trabalho, serão descritos o método de Okamura et al, já discutido acima, pela sua importância na vanguarda do CAA e também por ser provavelmente o primeiro método de dosagem de CAA; o método de Gomes et al (2002) para CAA de alta resistência; o método de Repette e Melo (2005); o método de Tutikian (2004) e Tutikian e Dal Molin (2007), ambos de referência na região em que está sendo desenvolvido este trabalho; o método de Alencar e Helene (2006), desenvolvido na indústria de pré-moldados.

3.6.6. Método de Gomes et al (2002)

A metodologia propõe a obtenção de CAA de alta resistência através da otimização da composição da pasta e do esqueleto granular em separado. Gomes e Barros (2009) sugerem, ainda, que a viscosidade e fluidez da pasta governem o comportamento de fluxo do concreto. A Figura 3.25 apresenta um esboço dos passos adotados pelo método.

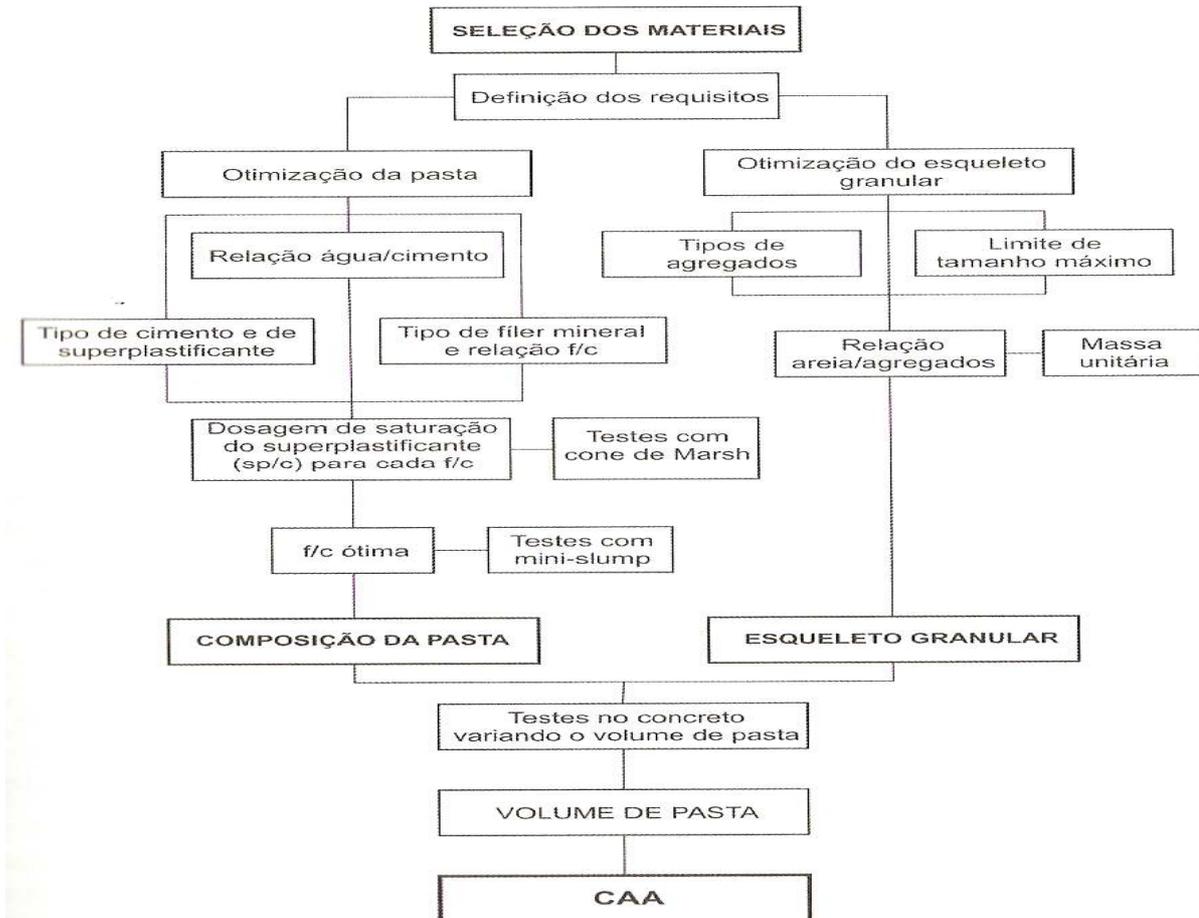


Figura 3.25: Diagrama do método de dosagem de Gomes et al (2002) (apud Gomes e Barros, 2009, p.145).

3.6.6.1. Seleção dos materiais

Na escolha dos materiais utilizados na mistura, deve-se atentar para as propriedades desejadas do concreto e da disponibilidade de materiais no mercado local.

3.6.6.2. Definição da composição da pasta

Primeiramente, é escolhida uma relação a/c , conforme propriedades desejadas do concreto. A relação superplastificante/cimento (SP/c) ideal para o CAA é determinada através do ensaio do cone de Marsh, onde é medido o tempo de fluxo (T) necessário para 500 ml de pasta fluir pela abertura inferior do cone.

Variando a relação SP/c na pasta, obtém-se uma curva log T versus SP/c, conforme Figura 3.26, com objetivo de definir o ponto de saturação¹⁸ da dosagem do SP.

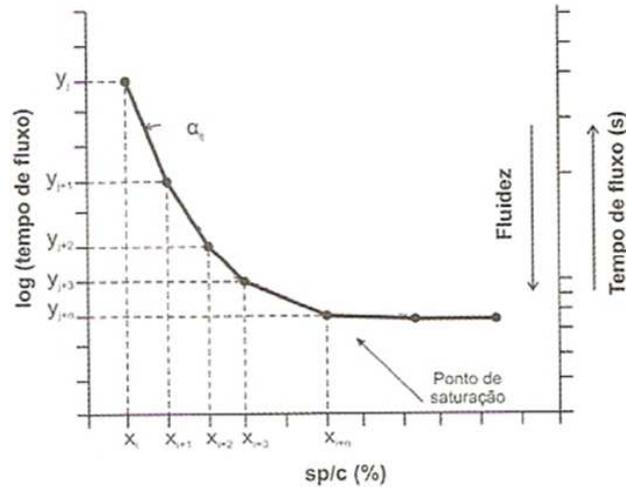


Figura 3.26: Exemplo da curva log T versus SP/c para determinação da dosagem de SP (Gomes e Barros, 2009, p.148).

A relação finos/cimento (f/c) adequada é aquela que atenda determinados requisitos do ensaio do miniabatimento: diâmetro de extensão final de $180 \text{ mm} \pm 10 \text{ mm}$ e um tempo T_{115} (tempo que a pasta leva para alcançar a marca de 115 mm) no intervalo de 2 s a 3,5 s, e também apresente boa coesão.

Verifica-se que o ponto de saturação do SP varia com a relação f/c . Portanto, para cada relação f/c , é definida uma relação SP/c ótima.

¹⁸Segundo Melo (2005), ponto de saturação é o teor máximo de SP capaz de promover o aumento de fluidez, a partir deste teor efeitos indesejáveis podem comprometer a mistura.

3.6.6.3. Definição do esqueleto granular

O esqueleto granular é obtido experimentalmente, escolhendo a mistura não compactada com menor teor de vazios. As proporções entre os agregados (areia e brita) encontradas no experimento são avaliadas como adequadas e serão utilizadas na confecção dos concretos.

3.6.6.4. Determinação da composição do CAA

Nesta etapa, busca-se o volume da pasta suficiente para preencher os vazios entre os agregados e assegurar a distância de separação entre as partículas desses. O volume de pasta adequado é aquele que possibilita o concreto atender requisitos de capacidade de preenchimento, capacidade de passagem entre armaduras e estabilidade ou ausência de segregação. Os ensaios utilizados para verificar estes requisitos são espalhamento ou funil V, caixa L e tubo U.

3.6.7. Método de dosagem de Repette e Melo (2005)

O método parte do estabelecimento da relação a/c , possibilitando produzir CAAs com resistências à compressão praticadas no concreto convencional. Gomes e Barros (2009) analisam que, neste método a relação volumétrica agregado miúdo/argamassa é determinada através dos ensaios de espalhamento e funil V, para argamassa, variando o teor de SP e o teor de agregado miúdo. O volume de agregado graúdo em relação ao volume total de concreto também é determinado através de ensaio de espalhamento, funil V e caixa L. Quanto ao proporcionamento dos materiais, o método combina areia média com areia fina e brita 1 com brita 0, definindo a melhor combinação entre os agregados miúdos e entre os agregados graúdos. A Figura 3.27 ilustra do método de dosagem.

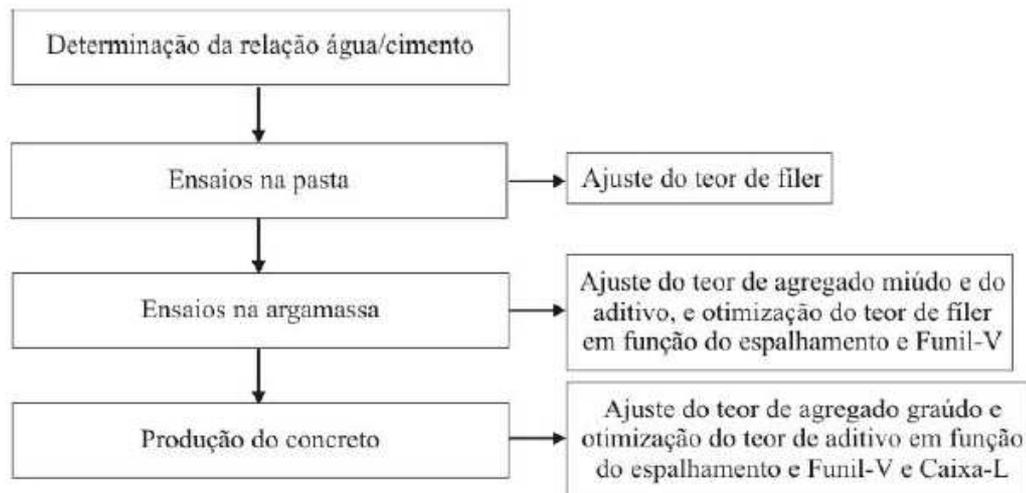


Figura 3.27: Fluxograma do método de dosagem de Repette e Melo (Melo, 2005, p.158).

3.6.7.1. Composição da pasta

3.6.7.1.1 Determinação da relação a/c

A relação de a/c é determinada com base na resistência à compressão desejada. Desta forma, a utilização de curvas da “lei da Abrams” para concretos convencionais que utilizem os mesmos materiais e o mesmo tipo de cimento é aconselhável. Para a definição da família de CAAs, devem-se adotar no mínimo três valores de resistência dentro do intervalo de interesse.

3.6.7.1.2 Teor de finos

Para cada relação a/c, um teor de finos será determinado. A relação f/c é encontrada, inicialmente, em misturas de pastas produzidas com a relação a/c anteriormente definida, de forma que não haja indícios de segregação ou exsudação destas misturas. Neste método, os finos são considerados as partículas que passam pela peneira de abertura de 0,075mm. A utilização destas adições está vinculada com a instabilidade da mistura, portanto, emprega-se essas até a eliminação de segregação da pasta. O teor de finos poderá ser ajustado posteriormente após a adição de SP e durante a realização dos ensaios de argamassa.

3.6.7.2. Composição da argamassa

3.6.7.2.1 Teor de agregado miúdo

Nesta etapa, ensaiam-se argamassas com diferentes teores de agregado miúdo e de SP. Somente as argamassas pertencentes à família de CAA, com teor intermediário de água serão ensaiadas, já que o resultado encontrado será utilizado para as demais misturas. O volume de agregado miúdo em relação ao volume total da argamassa não deve ser inferior a 35% e nem superior a 55%. As argamassas são avaliadas em função dos ensaios de espalhamento e funil V. O volume ideal de agregado miúdo é encontrado na mistura que contenha maior teor deste material e apresente resultados de trabalhabilidade adequados. A Tabela 3.5 apresenta exemplo de resultados para escolha do teor de agregado miúdo.

Tabela 3.5: Exemplo de resultados dos ensaios para escolha do teor de agregado miúdo (Melo, 2005, p.161).

Teor de aditivo (%)	Teor de agregado miúdo (%)		
	40	45	50
0,10	Espalhamento: não Funil-V: não	Espalhamento: não Funil-V: não	Espalhamento: não Funil-V: não
0,15	Espalhamento: ok Funil-V: ok	Espalhamento: ok Funil-V: não	Espalhamento: ok Funil-V: não
0,20	-	Espalhamento: ok Funil-V: ok	Espalhamento: ok Funil-V: não
0,25	-	-	Espalhamento: não Funil-V: ok

3.6.7.2.2 Ajuste final do teor de adição

Em função do uso de SP, a quantidade de adição definida na pasta pode ser aumentada, obtendo-se misturas mais econômicas. As argamassas são novamente avaliadas através dos ensaios de espalhamento e fluidez, mas, agora, com novas

faixas de aceitação (T_m e R_m), definidas conforme relação proposta pelo método de Okamura et al. e apresentadas no item 3.6.5.

3.6.7.3. Composição do concreto

3.6.7.3.1 Teor de agregado graúdo

Após a definição do teor de agregado miúdo da argamassa, com teor intermediário de água, são preparados concretos com diferentes relações de agregado graúdo em relação ao volume total do concreto (normalmente entre 27% e 33%) e realizados os ensaios de trabalhabilidade para o concreto (espalhamento, funil V e caixa L). Para cada relação de agregado graúdo, a dosagem de SP deve ser ajustada. O teor de agregado graúdo ideal é o máximo possível que atenda aos limites de aceitação. Também deve-se verificar a não ocorrência de bloqueio no ensaio de caixa L e de segregação no ensaio de funil V. A Tabela 3.6 apresenta os limites de aceitação para os ensaios.

Tabela 3.6: Limites de aceitação do CAA, conforme ensaio (Melo, 2005, p.163).

Método de ensaio	Valores aceitáveis para o CAA
Espalhamento (d)	600 a 700 mm
Funil-V (t)	< 10 s
Caixa-L (H_2/H_1)	$\geq 0,8$

3.6.7.3.2 Ajuste final do SP

Nesta etapa, realiza-se o ajuste final do teor de SP, novamente utilizando os ensaios de trabalhabilidade para verificação.

3.6.7.4. Avaliação das propriedades mecânicas

A resistência à compressão axial deve ser avaliada primeiramente nas argamassas a partir dos resultados, conforme a relação a/c empregada. Desta

maneira, pode-se corrigir algum erro de dosagem antes da produção do concreto. A resistência à compressão axial do concreto deve ser avaliada, utilizando três corpos-de-prova (CPs) por idade de rompimento e, para avaliação do módulo de elasticidade, molda-se outros dois CPs.

3.6.8. Método de dosagem de Tutikian (2004)

O método proposto por Tutikian (2004) é baseado no método de dosagem para concreto convencional IPT/EPUSP de Helene e Terzian (1992). É um método experimental e prático, composto por 9 passos, que tem como objetivo a mistura de três traços de concreto para assim, poder desenhar o diagrama de dosagem.

Basicamente, o método produz um concreto convencional, adiciona-se o SP, aumentando drasticamente a fluidez e ocorrendo a segregação. Com a adição de finos, corrige-se a viscosidade, eliminando a segregação, o resultado é o CAA. A Figura 3.28 ilustra a metodologia de Tutikian (2004).



Figura 3.28: Princípio básico do método proposto (Tutikian (apud Manuel, 2005, p.70)).

3.6.8.1. Escolha dos materiais

Os componentes são basicamente os mesmos do concreto convencional (cimento, agregado miúdo e graúdo e água), acrescidos de material fino, com área

superficial maior que a do componente que está substituindo, e SP. Eventualmente, é possível acrescentar o VMA, conforme Tutikian e Dal Molin (2008).

3.6.8.2. Determinação do teor ideal de argamassa seca

A determinação experimental do teor ideal de argamassa seca é realizada conforme método do IPT/EPUSP de Helene e Terzian (1992), sem aditivos e finos, e deve ser mantido constante até o final da dosagem do CAA. Em função do fino escolhido: não pozolânico (areia fina, fíler calcário, entre outros.), pozolânico ou cimentante (cinza de casca de arroz, matacaulim, sílica ativa, entre outros.), o método especifica equações que devem ser utilizadas para a determinação dos parâmetros para compor o traço e para o desenho da curva de dosagem, esclarece Tutikian e Dal Molin (2008).

3.6.8.3. Determinação dos traços rico, intermediário e pobre

Nesta etapa, devem ser escolhidos, no mínimo, três traços-base para o desenho do diagrama de dosagem: um rico, um intermediário e um pobre. Com a realização das curvas e consequente determinação dos coeficientes de correlação para uma família de concretos, será possível dosar qualquer mistura desejada com os mesmos componentes. Tutikian e Dal Molin (2008) comentam que deve-se manter o teor de argamassa constante em massa em todos os traços realizados.

3.6.8.4. Colocação de SP e consequente segregação

A colocação de aditivo é acompanhada da adição de finos com objetivo de corrigir a segregação do CAA (próximo passo). Tutikian e Dal Molin (2008, p.78) recomendam que:

(...) se comece com pequenas quantidades, na ordem de 0,30% da massa de cimento, e vá aumentando até chegar no ponto ideal [...]. O ponto ideal é obtido visualmente e ocorre quando o concreto está bastante fluido, sem levar em consideração a separação dos agregados graúdos da argamassa.

3.6.8.5. Acerto dos finos por substituição

Nesta etapa, segundo Tutikian e Dal Molin (2008), a segregação do concreto é corrigida com a adição de finos. Se o fino for pozolânico ou cimentante, substitui-se o cimento. Se não for pozolânico, substitui-se o agregado miúdo.

3.6.8.6. Ensaio de trabalhabilidade até o concreto convencional virar CAA

Para os autores acima, os ensaios de trabalhabilidade (espalhamento, caixa L e funil V) verificam se o concreto está ideal ou deve sofrer correções, através da adição de aditivos ou finos.

3.6.8.7. Comparação do CAA com e sem VMA

Para, os mesmos autores, evitar a segregação do concreto, pode-se também utilizar o VMA ao invés da adição de finos. Deve-se, contudo, avaliar economicamente a substituição de finos por VMA.

3.6.8.8. Ensaio de resistência à compressão nas idades determinadas

Com os traços prontos, segundo os estudiosos já citados, podem-se moldar os CPs para ruptura à compressão nas idades definidas. Com os resultados de compressão, é possível construir o diagrama de dosagem, realizar o cálculo das equações de comportamento e dos coeficientes de correlação.

3.6.8.9. Desenho do diagrama de dosagem

Por fim, com todos os dados calculados, pode-se desenhar o diagrama de dosagem.

3.6.9. Método de dosagem de Tutikian e Dal Molin (2007)

Tutikian e Dal Molin (2008, p.92) assim apresentam a metodologia de dosagem:

Utiliza os conceitos de O'Reilly (1992) para determinar o empacotamento granular máximo, os conceitos de De Larrard (1999) para escolha dos materiais, o diagrama de dosagem do IPT/EPUSP para permitir os cálculos de qualquer CAA dentro da faixa avaliada de uma mesma família estudada, o acerto do teor de aditivo, relação água/cimento e o procedimento básico de Tutikian (2004). Ainda acrescenta pontos novos, como a junção de todas essas teorias, o teor de argamassa variável, a inclusão da curva de custo no diagrama de dosagem e o diagrama de desempenho.

3.6.9.1. Escolha dos materiais

A dosagem pode ser realizada com quaisquer materiais, assim como no método de Tutikian (2004). Devem-se priorizar agregados arredondados e com menor diâmetro máximo para maximizar o empacotamento e reduzir a possibilidade de segregação. Segundo Tutikian e Dal Molin (2008), também é aconselhável especificar todas as faixas granulométricas para que ocorra uma distribuição contínua dos componentes.

3.6.9.2. Determinação do esqueleto granular

Neste passo, deve-se realizar o empacotamento, dois a dois e em ordem decrescente de diâmetro de partículas. Inicia-se com a brita. Caso existam duas britas, estas duas devem ser empacotadas, depois esta mistura é empacotada com a areia média. A mistura, resultante dos dois tipos de brita mais areia média, é empacotada com o fino utilizado (areia fina, fíler calcário, metacaulim, etc.). O único material que, segundo os autores, não é empacotado é o cimento. Para o ensaio de compacidade, De Larrard (apud Tutikian e Dal Molin, 2008) recomenda a utilização de recipiente com diâmetro de, pelo menos, cinco vezes o maior diâmetro médio das partículas empregadas na mistura.

Tutikian e Dal Molin (2008) determinam que o melhor empacotamento é definido pelo menor índice de vazios, determinado pela Equação 3.12, que utiliza os resultados do cálculo das massas específicas e unitárias das misturas, conforme Equações 3.10 e 3.11.

$$M_{espAB} = \frac{(M_{espA} \times \%A) + (M_{espB} \times \%B)}{100} \quad (3.10)$$

$$M_{unitAB} = \frac{(M_{unitA} \times \%A) + (M_{unitB} \times \%B)}{100} \quad (3.11)$$

$$V = \frac{M_{espAB} - M_{unitAB}}{M_{espAB}} \times 100 \quad (3.12)$$

Onde:

M_{espAB} : massa específica da mistura do material A com o material B;

M_{espA} : massa específica do material A;

M_{espB} : massa específica do material B;

$\%A$: porcentagem do material A na mistura;

$\%B$: porcentagem do material B na mistura;

M_{unitAB} : massa unitária da mistura do material A com o material B;

M_{unitA} : massa unitária do material A;

M_{unitB} : massa unitária do material B;

V: índice de vazios da mistura em porcentual.

3.6.9.3. Determinação da relação a/c ou teor de SP

Tutikian e Dal Molin (2008) recomendam determinar a relação a/c e o teor de SP antes da mistura, utilizando histórico de concretos similares, a experiência do responsável, e em função do traço intermediário. Além disso, ajustes, serão necessários durante os ensaios de trabalhabilidade. Também recomendam a utilização de aditivo plastificante para alcançar um abatimento inicial, melhorando o

desempenho do SP e reduzindo custos, já que o aditivo plastificante tem menor valor que o SP.

3.6.9.4. Mistura dos traços rico, intermediário e pobre

Nesta etapa, realiza-se a mistura de, no mínimo, três traços para a determinação das equações de comportamento e coeficientes de correlação possibilitando, assim, a elaboração das curvas de dosagem.

As proporções entre os agregados graúdos, miúdos e finos são mantidas constantes para todos os traços, e o percentual de SP também deve ser constante em relação ao cimento. Os autores esclarecem que o percentual de argamassa seca será variável.

3.6.9.5. Ensaio das propriedades mecânicas e de durabilidade nas idades determinadas

Para Tutikian e Dal Molin (2008), os CPs são moldados e curados para realização de ensaios de resistência à compressão e outros que sejam avaliados como necessários.

3.6.9.6. Desenho dos diagramas de dosagem e desempenho

Na última etapa do método são calculadas as equações (definidas pelo método) e os coeficientes necessários para desenhar as retas e as curvas do diagrama de dosagem.

3.6.10. Método de dosagem de Alencar e Helene (2006)

A metodologia de Alencar e Helene (2006) utiliza o conceito de correção da coesão do concreto fresco para subsidiar a grande fluidez, com incremento de adições minerais para a substituição do cimento, no caso do fino ser pozolânico, ou substituição do agregado miúdo, no caso do fino ser não-pozolânico, com área

superficial maior do que o material substituído. Segundo os autores, misturas mais pobres em cimento exigem um teor maior de substituição de finos em comparação com composições mais ricas para manter as mesmas características de trabalhabilidade, já que o cimento acaba enriquecendo a composição de finos da mistura. Esse conceito cria uma correlação entre a relação agregados secos/cimento (m) e o conteúdo ideal de substituição (T), agregando um 4º quadrante ao diagrama de dosagem do método original, do IPT/EPUSP de Helene e Terzian (1992), conforme Equação 3.13. Também ressalva que a adição de finos resolve o problema da falta de coesão da mistura, mas não da falta de capacidade passante entre barras sem bloqueio, que deve ser solucionada através do aumento do teor de argamassa.

$$m = k_9 + k_{10} \times T \quad (3.13)$$

Onde:

T : teor de substituição em massa do cimento ou areia seca por finos correspondentes kg/kg;

m : relação agregados secos/cimento, em kg/kg;

k_9, k_{10} : constantes que dependem exclusivamente dos materiais.

Alencar (2008) considera no método a utilização de ensaios do concreto no estado fresco para verificar a capacidade de enchimento por ação do seu peso próprio e de passagem por restrições e armaduras, com apropriado nível de resistência à segregação. O método define duas fases para ajuste do traço médio (ou intermediário), cada fase com quatro passos. Caso a mistura, na fase de verificação, não atenda aos requisitos do ensaio, é necessário voltar à fase de proporcionamento.

Na fase de proporcionamento dos materiais, os passos são os seguintes:

1º passo – teor de argamassa seca (α);

2º passo – teor de substituição (T);

- 3º passo – aditivo;
- 4º passo – relação a/agl.

Na fase de verificação, a trabalhabilidade é avaliada através dos seguintes ensaios:

- 1º passo – espalhamento e espalhamento t_{500} ;
- 2º passo – caixa L;
- 3º passo – funil V e funil V t_{5min} ;
- 4º passo – Column technique (ensaio de segregação conforme ABNT NBR 15823-6:2010).

Alencar (2008) prova a eficácia da metodologia de dosagem através de experimentos desenvolvidos na linha de produção de uma indústria de pré-fabricados. Utiliza a nova metodologia na dosagem de CAA sem adições e com adições (metacaulim e fíler) e de CAA branco, definindo níveis de consistência, conforme taxa de armadura, complexidade de fôrmas, qualidade de acabamento requerido, capacidade de absorção de pressão hidrostática das fôrmas e modo de lançamento. A Figura 3.29 ilustra o método Alencar e Helene (2006) para a dosagem do CAA.

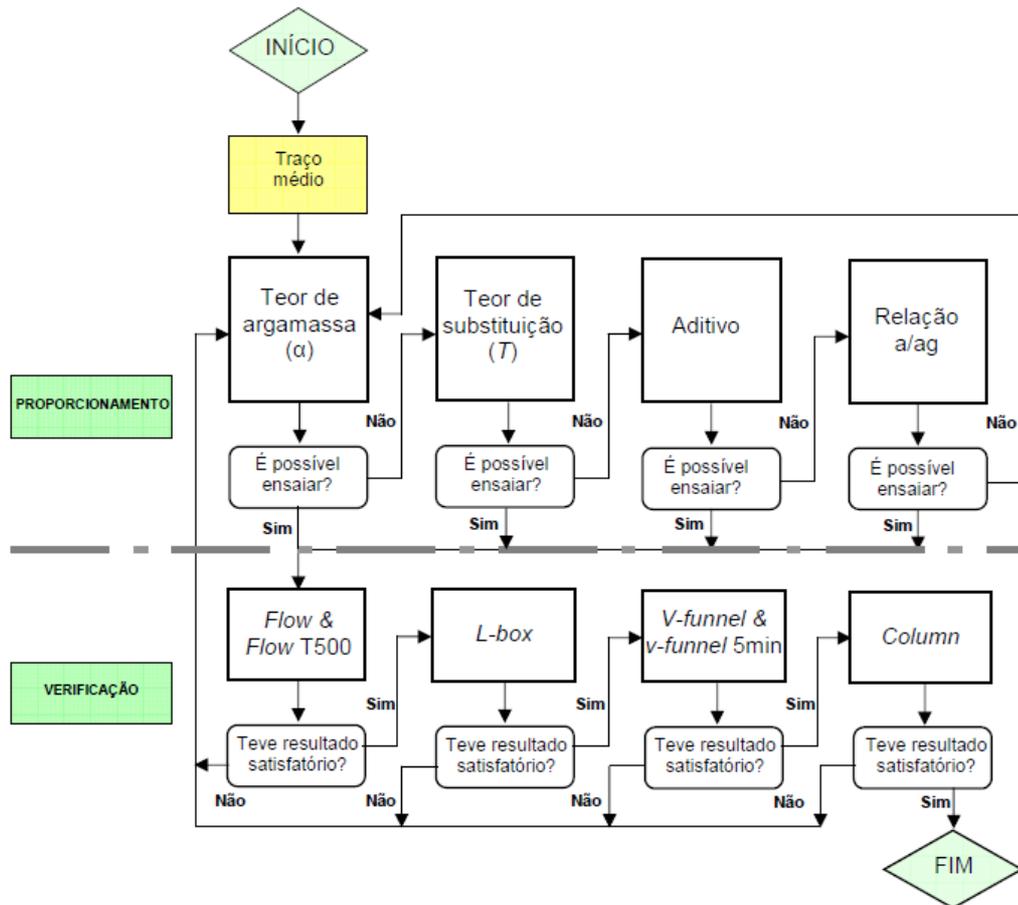


Figura 3.29: Sequência geral de tomada de decisão para proporcionamento de materiais e verificação de trabalhabilidade, segundo método Alencar e Helene (Alencar e Helene (apud Alencar, 2008, p. 67).

3.6.11. Comparação entre os métodos nacionais de dosagem de CAA

O Quadro 3.2 ilustra o estudo comparativo entre os cinco métodos nacionais de dosagem de CAA descritos nas seções anteriores. Através destes nove critérios e aspectos qualitativos e das pesquisas apresentadas pelos autores destes métodos, objetiva-se compreender melhor os conceitos utilizados para a elaboração dos métodos, verificar peculiaridades e semelhanças entre estes, e vantagens e/ou inconvenientes da utilização de cada método.

Primeiramente, verifica-se uma divisão dos métodos de dosagem em dois grupos. O primeiro grupo, formado pelos métodos de Gomes et al (2002) e Repette e Melo (2005), avalia as características da pasta, no caso do primeiro método, ou da pasta e da argamassa, no caso do segundo método, em termos de fluidez, viscosidade e segregação, conforme itens 2 e 3 do Quadro 3.2 para, posteriormente,

avaliar as características do concreto. Esses métodos estabelecem que as características da pasta ou da pasta e argamassa governam o comportamento do fluxo do concreto.

Outro fato importante deste grupo, conforme item 4 do Quadro 3.2, é a tentativa de extrair o máximo aproveitamento do SP, através da determinação do ponto de saturação.

Contudo, no que se refere à determinação do conteúdo ideal de SP, Alencar e Helene (apud Alencar, 2008, p.60) tecem a seguinte crítica sobre estes métodos:

Esses passos intermediários e pouco objetivos acabam por gerar procedimento lento e trabalhoso sem fundamento tecnológico nem científico, pois o conteúdo ideal e ótimo do aditivo depende da interação de todos os elementos do traço [...] e isso só é possível quando se produz o concreto.

Pereira (2010) concorda que a reologia do concreto é resultado da interação de todos os componentes, assim como definido por Alencar e Helene (2006), entretanto, ressalta que existem relatos de bons resultados de dosagens de CAAs, através da otimização em separado da pasta e agregados. O autor argumenta também a possibilidade de uma melhor verificação da compatibilidade entre cimento e SP quando se avalia somente a pasta ou argamassa através do ensaio de cone de Marsh ou do ensaio de miniabatimento.

Adicionalmente, verifica-se que estes métodos do primeiro grupo buscam determinar a melhor proporção dos materiais desde a etapa de dosagem da pasta até a etapa final de ajuste do concreto, evitando ao máximo o julgamento e a dependência da experiência do profissional responsável pela dosagem.

Quadro 3.2: Comparação entre os métodos nacionais de dosagem de CAA.

Item	Critério ou aspecto avaliado	Métodos nacionais de dosagem de CAA				
		Gomes et al (2002)	Repette e Melo (2005)	Tutikian (2004)	Tutikian e Dal Molin (2007)	Alencar e Helene (2006)
1	Busca o melhor proporcionamento dos agregados através da redução do volume de espaços entre as partículas.	SIM	SIM	NÃO	SIM	SIM
2	Avalia e ajusta indiretamente a viscosidade e fluidez da pasta.	SIM	SIM	NÃO	NÃO	NÃO
3	Avalia e ajusta indiretamente a viscosidade e fluidez da argamassa.	NÃO	SIM	NÃO	NÃO	NÃO
4	Determina o ponto de saturação de SP.	SIM	SIM	NÃO	NÃO	NÃO
5	A dosagem do SP em relação ao cimento é constante para todos os traços considerados de mesma “família”.	*	NÃO	SIM	SIM	SIM
6	Utiliza plastificante para melhora da trabalhabilidade do concreto antes da adição do SP.	NÃO	NÃO	SIM	SIM	NÃO
7	Corrige o teor de argamassa com objetivo de aumentar a trabalhabilidade do CAA.	NÃO	SIM	NÃO	NÃO	SIM
8	Considera as características de fluidez, viscosidade e coesão do concreto como um todo, sem avaliar pasta e argamassa em separado.	NÃO	NÃO	SIM	SIM	SIM
9	Utiliza algum tipo de diagrama para otimizar futuras dosagens de CAA.	*	SIM	SIM	SIM	SIM

*critério ou aspecto não identificado na literatura pesquisada.

Alencar e Helene (2006, p.48) avaliam os métodos dentro deste primeiro grupo analisado:

Os métodos normalmente empregados para dosificação de CAA são complexos e baseiam-se na incorporação de agregados. É definido inicialmente o teor de aditivo com base na saturação da pasta, que é posteriormente ajustado novamente na fase de composição da argamassa e só por fim no concreto; ensaiados em um laboratório bem equipado e com aparelhos muito específicos. Um processo demorado e difícil de ser realizado em planta industrial de pré-moldados ou centrais dosadoras.

Tutikian (2004, p.80) verifica também a desvantagem de otimizar o concreto de forma isolada, ou seja, estudar em separado pasta e esqueleto granular como definido no método de Gomes et al (2002):

Mas a divisão em duas partes, que já foi citada como vantagem, também pode ser considerada uma desvantagem, pois o concreto é uma mistura entre diversos materiais que trabalham em conjunto, assim é perigoso quantificar um a um, não considerando a interação entre eles.

Uma diferença importante entre estes dois métodos deste primeiro grupo encontra-se na faixa de resistência à compressão resultante da dosagem. O método de Gomes et al (2002) trabalha com resistências altas, enquanto o método de Repette e Melo (2005) trabalha com faixas próximas de um concreto convencional.

Os itens 2, 3 e 8 do Quadro 3.2 demonstram que o segundo grupo, formado pelos métodos Tutikian (2004), Tutikian e Dal Molin (2007) e Alencar e Helene (2006), avalia o comportamento do concreto como um todo, sem a prévia avaliação das características de fluidez, viscosidade e segregação da pasta e/ou argamassa.

Com relação à correção do teor de argamassa, conforme item 7 do Quadro 3.2, verifica-se que os métodos de Tutikian (2004) e Alencar e Helene (2006) utilizam o procedimento de determinação do teor ideal de argamassa seca (α) para concreto convencional do método do IPT/EPUSP de Helene e Terzian (1992), como

ponto de partida para determinar o α do CAA. No método de Tutikian (2004), o α encontrado para o concreto convencional será utilizado na dosagem do CAA, portanto não haverá ajustes. Já, no método de Alencar e Helene (2006), Alencar (2008) sugere iniciar com um teor de argamassa em torno de 53% e, se necessário, para se atingir a trabalhabilidade requerida, pode-se aumentar este teor. No método de Repette e Melo (2005), o teor de argamassa pode ser ajustado na etapa de escolha do teor de agregado graúdo. Nos métodos de Gomes et al (2002), Tutikian (2004) e Tutikian e Dal Molin (2007) o teor de argamassa não é ajustado.

O método Tutikian e Dal Molin (2007) utiliza conceitos de empacotamento para determinação da melhor relação entre as partículas. Desta maneira, o teor de argamassa de uma mesma família de concretos é variável e depende do empacotamento entre os agregados e finos. Nota-se que o proporcionamento entre agregados e finos é constante para todos os traços, mas, como a porcentagem de cimento varia para cada traço (1:m-x, 1:m, 1:m+x), o teor de argamassa é menor para traços mais pobres e maior para traços mais ricos. Conforme item 1, do Quadro 3.2, este é o método do segundo grupo que apresenta o estudo mais aprofundado com relação ao proporcionamento dos materiais. Pode-se dizer que o proporcionamento dos materiais, ou seja, a busca pelo menor índice de vazios da mistura, será o fator principal para a dosagem do CAA deste método. No método de Alencar e Helene (2006), o proporcionamento dos agregados restringe-se à combinação de duas classes de agregados graúdos. O método de Gomes et al (2002) define a melhor combinação entre agregado miúdo e graúdo, através da determinação da mistura não compactada com o menor índice de vazios. O método de Repette e Melo (2005) determina a melhor combinação entre areia média e fina e entre brita 1 e brita 0.

Conforme item 9 do Quadro 3.2, todos os três métodos do segundo grupo utilizam os fundamentos do método IPT/EPUSP de Helene e Terzian (1992) para construção dos diagramas de dosagem do CAA. No método de Alencar e Helene (2006), acrescentou-se um 4º quadrante, relacionando a adição de finos com a relação agregados secos/cimento (m). Segundo o autor, formulações mais pobres em cimento exigem maior teor de substituição de finos (T) para manter a coesão. No

método de Tutikian (2004), acrescentou-se uma curva de custo e o desenho de outro diagrama, denominado de “diagrama de desempenho”¹⁹. No método de Tutikian e Dal Molin (2007), acrescentou-se um 4º q quadrante, relacionando teor de argamassa com consumo de cimento e, como no método anterior, acrescentou-se uma curva de custo e o “diagrama de desempenho”. O método de Repette e Melo (2005) grafica a “lei de Abrams”, a relação entre a/c e consumo de fíler, e a relação consumo de fíler e consumo de cimento, para auxiliar o processo de dosagem.

Pode-se, ainda, verificar que o método de Tutikian (2004) sofreu melhorias, resultando no método Tutikian e Dal Molin (2007), conforme relatado por Tutikian e Dal Molin (2007, p.53-54):

Porém, observou-se, durante a dosagem do CAA, que o teor de argamassa ideal é baixo para que a mistura passe pelos obstáculos facilmente.

Outro ponto observado com a prática, onde o método pode ser aperfeiçoado, é em relação à dependência de uma certa experiência do responsável pela dosagem. Isto ocorre, pois o acerto da quantidade de água, do aditivo superplastificante e do porcentual de finos é experimental.

Por fim, ainda há a crítica sobre o fato de o método não contemplar o estudo prévio dos agregados, fazendo com que se determine aleatoriamente a proporção entre duas classes de agregados graúdos, se for do interesse do profissional esta composição.

Mais alguns comentários podem ser feitos em relação ao método Tutikian e Dal Molin (2007):

¹⁹Para Tutikian (2007, p.77), o objetivo do diagrama de desempenho é similar ao de dosagem: com dois ou três resultados de um determinado ensaio, preferencialmente os de durabilidade, ter possibilidade da determinação das equações de comportamento e a possibilidade de cálculo desta propriedade para quaisquer valores de resistência à compressão, por exemplo. O diagrama de desempenho consiste em relacionar a resistência à compressão com propriedades de durabilidade ou até mecânicas do concreto.

- a) a realização de empacotamento das partículas da mistura, resultando em uma relação de proporcionamento entre os materiais, minimiza a tarefa experimental da definição do α , o que ocorre no método de Tutikian (2004) e Alencar e Helene (2006);
- b) o fato do teor de argamassa ser menor em traços mais pobres, com menor porcentagem de cimento, vai contra a ideia de Alencar (2008), que estabelece que misturas mais pobres necessitam maior quantidade de finos para manter a coesão, e que as misturas de CAA necessitam incrementos no teor de argamassa para a melhora da habilidade passante entre as armaduras;
- c) a grande quantidade de finos, muitas vezes utilizada neste método, para a redução do teor de vazios e aumento da compacidade, pode resultar em um abatimento inicial baixo ou, na pior das situações, demandar uma quantidade de água inicial elevada para realização da mistura antes da adição do SP.

Sobre o método de Alencar e Helene (2006), também pode-se realizar os seguintes comentários:

- a) o processo de definição do teor ideal de argamassa, teor ideal de substituição, teor de SP e da relação a/agl , através dos diversos ensaios de trabalhabilidade, torna a dosagem dependente de uma certa habilidade do responsável pela dosagem, assim como o método de Tutikian (2004);
- b) a correção do teor de argamassa (item 7 do Quadro 3.2) como artifício para obter uma maior capacidade passante é válida, considerando, no dizer de Castro (2007), como verdadeiro o fato de que, quanto maior o teor de argamassa, maior será a trabalhabilidade do concreto e, particularmente, importante quando verifica-se a perda de trabalhabilidade extremamente

rápida dos SP utilizados no mercado. O CAA dosado desta maneira pode apresentar uma característica de autoadensabilidade não tão dependente do SP e de finos.

Quanto à utilização de aditivos plastificantes, conforme item 6 do Quadro 3.2, averiguou-se que somente os métodos de Tutikian (2004) e Tutikian e Dal Molin (2007) sugerem a utilização desse aditivo para a obtenção de um abatimento inicial antes da adição do SP e maior eficiência já que alguns SP não atingem máximo desempenho em misturas muito secas (com baixo abatimento).

Nos três métodos do segundo grupo, a dosagem do SP é constante em relação à massa do cimento para todos os traços da mesma família. Para Tutikian (2004) e Tutikian e Dal Molin (2007), esta constância permitirá que todos os traços possam ser considerados da mesma família. O método de Repette e Melo (2005) não estabelece que a dosagem de SP/c deva ser constante para os CAAs de mesma família.

Alves e Helene (1994) constataram, na dosagem de concretos fluidos de diferentes traços (1:m-1, 1:m, 1:m+1) de mesma relação SP/c, que as misturas mais ricas apresentaram maiores níveis de fluidez, quando comparadas com misturas mais pobres. Ou seja, concretos com formulações mais ricas necessitam menor quantidade de SP em relação à massa de cimento para alcançar um determinado abatimento, quando comparado com concretos mais pobres.

Em função do que foi exposto, verifica-se que, nos métodos de dosagem de Tutikian (2004), Alencar e Helene (2006) e Tutikian e Dal Molin (2007), a manutenção da mesma relação SP/c para os traços da mesma família pode resultar em uma dificuldade de se obter a mesma trabalhabilidade desses traços. Nos traços pobres, provavelmente, será necessária uma quantidade elevada de água para a constância da trabalhabilidade, já que a dosagem do SP/c poderá ser insuficiente.

3.7. Avaliação das propriedades no estado endurecido

3.7.1. Propriedades mecânicas

3.7.1.1. Resistência à compressão axial

De maneira geral, na engenharia, conforme Neville (1997), considera-se que a resistência do concreto, em uma certa idade e sob determinada condição de cura, depende de apenas dois fatores: a relação a/c , conforme a “lei de Abrams”, e o grau de adensamento.

Entretanto, a influência da relação a/c sobre a resistência não constitui uma verdadeira “lei”. Sabe-se que, conforme aponta Neville (1997), a resistência do concreto depende de outros fatores como o grau de hidratação do cimento, suas propriedades físicas e químicas, da temperatura à qual tem lugar a hidratação, o teor de ar do concreto, o teor de cimento e as propriedades da interface agregado e pasta de cimento.

O modelo teórico mais atualizado para representar a resistência do concreto foi desenvolvido por Powers (Helene e Terzian, 1992). Powers e Brownyard (apud Neville, 1997, p.282) determinaram a relação entre a evolução da resistência e a razão gel/espço. Esta razão é definida como o quociente do volume da pasta de cimento hidratada pela soma dos volumes do cimento hidratado e dos poros capilares.

Segundo Mehta e Monteiro (1994), “nos sólidos existe uma relação fundamental inversa entre porosidade e resistência, para materiais homogêneos simples”. Os mesmos autores verificam que, na pasta ou argamassa de cimento endurecido, a porosidade pode ser relacionada com a resistência, no concreto essa relação existe, mas é mais complexa.

Para Neville (1997), apesar de a porosidade ser um fator primário que influencia a resistência da pasta de cimento, havendo proposições relacionando o logaritmo da porosidade com a resistência, a forma dessa relação é incerta.

Conforme comentado no item 3.2.3 e assinalado por Collepardi (2007), a resistência à compressão do CAA pode ser melhorada através da adição de finos na mistura. Também existe um consenso na literatura de Neville (1997), Mehta e Monteiro (1994) e Moosberg-Bustness et al. (2004), que a adição de finos pode melhorar a resistência à compressão, não somente do CAA, mas de concretos de forma geral.

Domone (2007), que analisou os dados de mais de 70 trabalhos que utilizaram diversos tipos de adições, verificou que a adição de fíler calcário na dosagem de CAAs contribuiu de maneira significativa no aumento do resultado de resistência à compressão. Georgiadis et al. (2007) investigaram a influência de diversas adições sobre CAAs e também encontraram melhores resultados de resistência mecânica nas misturas que utilizaram o fíler calcário.

Parra et al. (2007) verificaram aumentos e reduções na ordem de 10% na resistência à compressão em CAAs dosados com fíler calcário, dependendo das faixas de adição do fíler, quando comparados com concretos convencionais de mesma relação *a/c* e igual tipo de cimento. Os CAAs com maiores faixas de adição e menor relação *a/c* obtiveram os menores resultados, enquanto os CAAs, com menores faixas de adição e maior relação *a/c*, obtiveram os maiores resultados de resistência.

Quanto a anomalias que podem ocorrer nos resultados de resistência à compressão do CAA, Oliveira et al. (2003) destacam a segregação. Avaliando os efeitos da segregação sobre a resistência à compressão do CP, Zanetti (2010) afirma que, concretos com alto grau de exsudação, podem resultar em grande perda de água ainda no estado plástico, comprometendo a altura do CP e, principalmente, a relação *a/c* no topo. Os CPs, quando submetidos ao ensaio de compressão,

rompem, no topo, por esmagamento onde a relação a/c está alterada pela exsudação.

3.7.2. Aspectos de durabilidade

Neville (2007) esclarece que a durabilidade inadequada se manifesta por uma deterioração originada por fatores externos ou por motivos internos, dentro do próprio concreto. Com exceção da deterioração mecânica²⁰, quase todas as influências desfavoráveis decorrem do transporte de fluidos através do concreto. A facilidade com a qual os fluidos, tanto líquidos como gases, podem ingressar no concreto e se deslocar no seu interior, geralmente é nomeada como permeabilidade do concreto.

Segundo Larbi (apud Neville, 1997, p. 482), apesar da maior porosidade na região da interface, a permeabilidade do concreto é controlada pela pasta de cimento hidratada, única fase continua do concreto. Por sua vez, para Neville (1997), a permeabilidade da pasta de cimento é controlada pela porosidade capilar. Assim, pode-se admitir, de maneira geral, que a relação entre a permeabilidade e a estrutura de poros do concreto é qualitativa.

Já Mehta e Monteiro (1994) argumentam que, a permeabilidade da argamassa ou concreto é maior que a permeabilidade da pasta do cimento em razão das microfissuras presentes na zona de transição.

Pereira (2010) verifica que a deterioração mecânica, a resistência e a permeabilidade apresentam em comum o fato da dependência do sistema de poros

²⁰Neville (1997) esclarece que as causas de deterioração mecânica podem ser impacto, abrasão, erosão ou cavitação.

do concreto. Em geral, quanto menor a porosidade, melhor o desempenho do concreto.

Neville (1997) aborda que, adicionalmente, o concreto apresenta vazios decorrentes do adensamento incompleto e da água de exsudação aprisionada, que podem ocupar entre menos de 1% e 10% do volume do concreto.

3.7.2.1. Absorção de água por imersão

O ensaio de absorção de água por imersão é utilizado por diversos autores na avaliação da durabilidade de concretos, entre os quais Formagini (2005) e Hameed (2005).

A CEB-192 (apud Giannotti, 2006, p.113) relaciona a qualidade do concreto com a absorção da água: menor que 3%, baixa absorção e boa qualidade; de 3% a 5% absorção e qualidade média e, maior que 5%, alta absorção e qualidade pobre.

Helene (apud Giannotti, 2006, p.113) também relaciona a durabilidade do concreto com a absorção da água: menor que 4,2%, classificado como duráveis; de 4,2% a 6,3% classificado como normais e, para valores maiores que 6,3% os concretos são considerados deficientes.

Já De Schutter e Audenaert (2004) salientam que a absorção de água por imersão fornece uma estimativa do volume total de poros permeáveis, mas não uma estimativa sobre a conexão destes poros e a velocidade com que ao fluido se conecta através dos poros. Portanto a absorção não fornece uma indicação acurada sobre a permeabilidade do concreto e, conseqüentemente, da sua durabilidade.

Segundo Neville (1997, p.485):

mede-se pela absorção o volume dos poros, que nada tem a ver com a facilidade com a qual um fluido pode penetrar no concreto; não existe uma relação necessária entre as duas quantidades. Geralmente se mede a

absorção secando uma amostra até a constância da massa, imergindo em água, determinando-se o acréscimo de massa como porcentagem seca.

Neville (1997, p.486) complementa: “a absorção não pode ser usada como uma medida de qualidade do concreto, mas a maioria dos bons concretos têm absorção bem abaixo de 10% em massa”.

Sonebi e Ibrahim (2007) relatam que a permeabilidade do concreto é influenciada pela porosidade e a conectividade dos poros da pasta de cimento, além das microfissuras do concreto, especialmente a interface pasta e agregado.

O resultado de absorção de água, na visão de Borralleras et al. (2007) e Dinakar et al. (2008), é influenciado pelo volume de pasta do concreto. Dinakar et al. (2008) afirma que concretos com maiores volumes de pasta tendem apresentar maiores resultados de absorção de água que concretos com menores volumes de pasta.

Pereira (2010) acrescenta que, pela teoria de percolação, uma porosidade total baixa implica em uma baixa permeabilidade, o que justificaria utilizar o ensaio de absorção por imersão como medida de qualidade do concreto.

Hammed (2005) encontrou resultados de absorção de água por imersão em ensaio realizado conforme a ASTM C 642²¹, em CPs de CAAs não superiores a 3,72%, para uma relação a/agl de 0,42.

²¹Segundo Neville (1997), a ASTM C 642-90 prescreve um ensaio para pequenas amostras de concreto; faz-se uma secagem entre 100°C e 110°C se guida de imersão em água a 21°C durante pelo menos 48 horas. Para o mesmo autor, a determinação da absorção de água por imersão, com diferentes condições de secagem e de imersão, como por exemplo a utilização de fervura, influenciam fortemente os resultados.

Dinakar et al. (2008) encontraram resultados de absorção por imersão após 96 horas, em ensaio conforme a ASTM C 642-82, de 8,84% a 4,33% para CAAs com resistência à compressão aos 28 dias de 14,6 MPa a 71,6 MPa respectivamente.

Gonçalves (2000) verificou valores de absorção por imersão, em ensaio realizado conforme a ABNT NBR 9778, 1987, na faixa de 4,53% a 5,53% para concretos convencionais e concretos convencionais com adição de RCG (resíduo de corte de granito), para uma relação a/c de 0,40.

Borralleras et al. (2007) apresentaram resultado médio de absorção por imersão aos 63 dias, em ensaio realizado conforme a ASTM C 642-97, de 6,7% para um CAA de relação a/agl de 0,40, e resistência à compressão média aos 28 dias de 76 MPa.

De Schutter e Audenaert (2004) encontraram valores de absorção por imersão na faixa de 3,4% a 6,1% em CAAs para relações de a/c de 0,37 a 0,55. O ensaio de absorção por imersão foi realizado conforme a norma NBN B15-215, 1989²² da Bélgica.

²²Para Schutter e Audenaert (2004) o ensaio consiste na imersão em água das amostras até que a variação de massa em 24 horas não seja superior a 0,1%. Após estabilização da massa da amostra, esta é definida como a massa saturada. Posteriormente, as amostras são secas em forno a temperatura de 105±5°C até que a diferença de massa durante 24 horas não seja superior a 0,1%, esta é definida como massa seca. A absorção de água por imersão é definida como a diferença entre massa saturada e massa seca da mostra, dividida pela massa seca da amostra.

3.7.2.2. Absorção de água por capilaridade

Gjørsv (1994) constata que métodos para determinação da absorção de água por capilaridade têm sido usados em vários países como avaliação da qualidade do concreto.

Ensaio de absorção de água por capilaridade medem a velocidade de absorção de água por sucção capilar de concreto não saturado posto em contato com a água. Seu ensaio determina a velocidade de absorção por ascensão capilar de um prisma de concreto que se apoia sobre suportes de maneira que somente uma pequena parte (2 mm a 5 mm) fique imersa.

Conforme Nepomuceno (2005) a absorção capilar é um dos mecanismos de transporte que mais afeta a durabilidade das edificações sujeitas a ciclos de umedecimento e secagem.

Segundo Oliveira (apud Díaz, 1998, p.121), o ensaio de absorção por capilaridade pode não refletir a permeabilidade do concreto, porém, no caso particular de estruturas de edifícios sujeitas à neblina marítima, o fenômeno inicial de entrada do meio agressivo na estrutura é regido pela absorção capilar.

Zhu e Bartos (2002) verificaram menores resultados de absorção de água por capilaridade em CAAs quando comparados com concretos convencionais. Os autores atribuem estes resultados à redução da porosidade da zona de interface entre pasta e agregado, e uma melhor distribuição dos poros na matriz da pasta.

Borralleras et al. (2007) apresentaram resultados de absorção capilar após 72 horas na ordem de 0,21 g/cm² para um CAA de relação a/agl de 0,40, e resistência à compressão média aos 28 dias de 76 MPa.

Nunes (2001) encontrou valores de absorção por capilaridade após 72 horas (obtido por extrapolação) inferiores a 0,35 g/cm², em um CAA com relação a/agl de 0,45 e resistência à compressão aos 28 dias entre 44 e 47MPa.

4. MATERIAIS E MÉTODOS

Neste capítulo é apresentado o programa experimental desenvolvido no trabalho, que compreende a caracterização dos materiais utilizados na dosagem, os procedimentos e equipamentos utilizados na combinação dos agregados, nos ensaios de trabalhabilidade, nos ensaios mecânicos e de durabilidade dos CAAs e do concreto convencional.

Para a análise das propriedades mecânicas, foram utilizados ensaios de resistência à compressão axial aos 7 e 28 dias. Realizou-se também ensaios para a determinação da absorção de água e índice de vazios aos 28 dias, e de absorção de água por capilaridade aos 104 dias. Os ensaios de absorção de água por imersão e por capilaridade são classificados neste trabalho como ensaios de durabilidade.

4.1. Planejamento Geral

O presente projeto de pesquisa foi desenvolvido no Laboratório de Materiais de Construção da Pontifícia Universidade Católica do Rio Grande do Sul (PUC-RS). Realizou-se a dosagem de um CAA conforme definido pelo método de dosagem de Tutikian e Dal Molin (2007), e um CAA dosado conforme definido pelo método de dosagem de Alencar e Helene (2006). Adicionalmente, foi dosado um CAA e um concreto convencional utilizando os conceitos dos métodos CIENTEC e IPT/EPUSP de Helene e Terzian (1992) e a partir das contribuições teóricas e práticas do professor Fernando Antonio Piazza Recena.

O concreto convencional de cada traço-base foi produzido com os mesmos materiais, mesma proporcionalidade entre os agregados miúdos e graúdos e igual

teor de argamassa seca do CAA dosado conforme procedimento deste trabalho. O que diferenciou o concreto convencional do CAA foi somente a adição do SP.

O procedimento de dosagem do CAA deste trabalho utilizou conceitos do método empírico de dosagem de concretos convencionais, denominado método CIENTEC, conforme Recena (2011), para a avaliação da melhor combinação entre agregados graúdos, através da estimativa do menor volume de vazios da mistura não compactada.

O procedimento definiu também o teor apropriado de argamassa seca do CAA, utilizando primeiramente o método CIENTEC de dosagem para definição do teor de argamassa seca para um concreto convencional, conforme detalhado por Recena (2011). Em seguida, de posse desse valor de teor de argamassa, realizou-se teste experimental, com a adição de água em excesso no concreto, determinação da consistência e avaliação visual, estimando-se assim a manutenção da coesão do concreto para um dado teor de argamassa após a adição do SP.

Empregou-se, ainda, a ideia de que o teor de argamassa, para cada traço-base, poderia variar, conforme necessidade, principalmente, considerando que, em traços mais pobres, onde há maior possibilidade de perda de coesão em virtude da carência de pasta, existe a necessidade de maiores volumes de argamassa. Neste trabalho também utilizou-se da dosagem de SP/c variável para cada traço-base, conforme necessidade de incremento de trabalhabilidade a partir de um abatimento inicial.

O procedimento de dosagem proposto neste trabalho abordou a formulação das misturas de CAA de maneira análoga dos métodos de Tutikian e Dal Molin (2007) e Alencar e Helene (2006), no que tange ao fato de avaliar o concreto como um todo, sem a avaliação prévia da pasta ou da argamassa de forma isolada. Assim, como os dois métodos de dosagem de CAA citados, o método deste trabalho utiliza diagramas e determina as equações de correlação dos resultados experimentais dos traços da mesma família de concretos, com o objetivo de otimizar futuras dosagens. Por essas razões, a comparação foi restrita a esses três métodos.

O método de Tutikian (2004) não foi usado na comparação, pois entende-se que sofreu melhorias, conforme item 3.6.11., resultando no método Tutikian e Dal Molin (2007) e também com o objetivo de restringir a análise comparativa.

Em todas as dosagens, utilizaram-se os traços-base 1:3, 1:4,5 e 1:6 (nomenclatura que relaciona cimento e agregados secos totais, em massa) que caracterizam uma mistura com traço chamado de rico, intermediário e pobre, respectivamente.

A porcentagem de aditivo plastificante em relação ao cimento, em massa, igual a 0,6%, foi a mesma para todos os traços de todos os concretos.

No método de dosagem do presente trabalho, foi feita a dosagem prévia dos 3 traços-base e, no método de Tutikian e Dal Molin (2007), foi feita a dosagem prévia do traço rico e intermediário. Essas dosagens tiveram o objetivo de verificar anomalias na trabalhabilidade das misturas e, se necessário, de realizar ajustes. No método de Alencar e Helene (2006), a dosagem prévia foi realizada somente para o traço intermediário, para a definição do teor de substituição desse traço, e do teor de argamassa de todos os traços-base.

Na avaliação dos concretos no estado fresco, utilizou-se o ensaio de abatimento do tronco de cone para o concreto convencional, conforme norma ABNT NBR NM 67, 1998, e, para os CAAs, considerou-se os ensaios de espalhamento e tempo de escoamento (t_{500}), caixa L, funil V e segregação respectivamente, conforme ABNT NBR 15823-2, 2010; ABNT NBR 15823-4, 2010; ABNT NBR 15823-5, 2010 e ABNT NBR 15823-6, 2010. A fabricação dos equipamentos para realizar os ensaios da caixa L, funil V e segregação seguiram respectivamente, as orientações das normas ABNT NBR 15823-4, 2010; ABNT NBR 15823-5, 2010 e ABNT NBR 15823-6, 2010.

As classes de trabalhabilidade dos CAAs objetivadas neste trabalho foram SF1 para o espalhamento (mínimo aceitável, podendo-se atingir até o limite superior da classe SF2), VS1 para o tempo de escoamento t_{500} , PL2 para a caixa L, VF1

para o funil V e SR1 para o ensaio de segregação, todas essas classes definidas conforme ABNT NBR 15823-1, 2010.

Para os ensaios do concreto no estado endurecido, moldou-se sempre um exemplar, e considerou-se para a avaliação do desempenho do CAA ou do concreto convencional o resultado mais satisfatório do exemplar, conforme análise a ser feita. Todos os CPs foram moldados com as dimensões cilíndricas de 100 x 200 milímetros.

A Figura 4.1 ilustra o fluxograma do programa experimental para o estudo comparativo entre os dois métodos de dosagem de CAA e o procedimento de dosagem proposto neste trabalho. A quantidade de exemplares moldados está relacionada abaixo:

- a) 2 CPs para cada traço-base (1:3, 1:4,5 e 1:6) e para cada idade de rompimento no ensaio de resistência à compressão (7 e 28 dias), realizado em prensa com capacidade de 200 toneladas, e conforme a ABNT NBR 5739, 2007, totalizando 48 CPs;
- b) 2 CPs para cada traço-base (1:3, 1:4,5 e 1:6) no ensaio de absorção de água por imersão e determinação de índice de vazios, realizado conforme definido pela ABNT NBR 9778, 2005, totalizando 24 CPs;
- c) 2 CPs para cada traço-base (1:3, 1:4,5 e 1:6) na determinação da absorção de água por capilaridade realizado conforme a ABNT NBR 9779, 1995, totalizando 24 CPs.

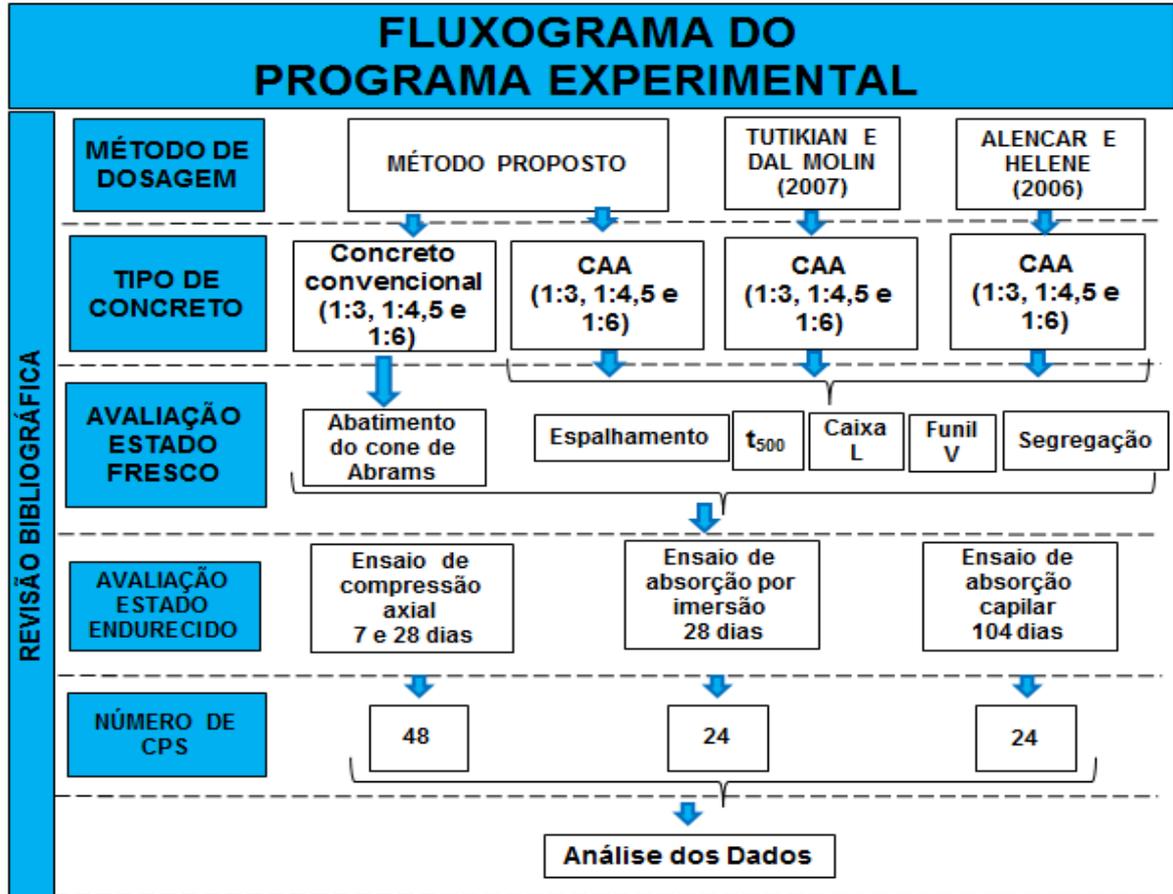


Figura 4.1: Fluxograma do programa experimental.

4.2. Caracterização dos Materiais Utilizados

4.2.1. Cimento

O cimento utilizado foi o CII-Z-32 cuja composição química e exigências físicas e mecânicas, definidas por norma, são apresentadas nas Tabelas 4.1 e 4.2.

Tabela 4.1: Composição química (dados do fabricante).

<i>Composição Química</i>	<i>Faixas de aceitação (%)</i>
Clínquer + Gesso	76 a 94%
Calcário	0 a 10%
Pozolana	6 a 14%

Tabela 4.2: Exigências físicas e mecânicas (dados do fabricante).

Exigências Físicas e Mecânicas		Faixas de aceitação (%)
Resíduo na peneira 75 mm (%)		≤ 12,0
Área específica (m ² /kg)		≥ 260
Tempo de pega:	Início (horas)	≥ 1,0
	Término (horas)	≤ 10,0
Resistência à compressão (MPa)	3 dias	≥ 10
	7 dias	≥ 20
	28 dias	≥ 32

4.2.2. Aditivos

Os aditivos utilizados foram o aditivo plastificante que atende à ABNT NBR 11768 (tipo P), e o aditivo superplastificante base de policarboxilato, que atende à ABNT NBR 11768. As características, fornecidas pelo fabricante, dos aditivos são apresentadas nas Tabelas 4.3 e 4.4.

Tabela 4.3: Características do aditivo plastificante (dados do fabricante).

Propriedade	Característica do aditivo
Principal componente químico	Lignosulfonato
Densidade (kg/L)	1,2 ± 0,02
Estado físico	Líquido
Teor de sólidos médio (%)	36,9 ± 1,84
Dosagem recomendada pelo fabricante (%m.c)	0,36 – 1,2

Tabela 4.4: Características do aditivo superplastificante (dados do fabricante).

Propriedade	Característica do aditivo
Principal componente químico	Policarboxilato
Densidade (kg/L)	1,1 ± 0,02
Estado físico	Líquido
Teor de sólidos médio (%)	49 ± 2,45
Dosagem recomendada pelo fabricante (%m.c)	0,33 – 2,2

4.2.3. Agregados Miúdos e Graúdos

A determinação da composição granulométrica dos agregados graúdos (brita 0 e 1) e agregados miúdos (areia média e areia fina) foi realizada conforme ABNT NBR 7217, 2003. A massa específica do agregado graúdo e miúdo foi determinada conforme ensaio definido pela ABNT NBR NM 53, 2009 e ABNT NBR NM 52, 2009. A massa unitária do agregado graúdo e miúdo foi definida conforme ensaio descrito pela ABNT NBR NM 45, 2006. Na caracterização e combinação dos agregados, trabalhou-se sempre com os materiais secos. A Tabela 4.5 apresenta a análise granulométrica e as massas específicas e unitárias dos agregados utilizados no trabalho. A Figura 4.2 apresenta o gráfico da análise granulométrica dos agregados.

Tabela 4.5: Análise granulométrica e massas específicas e unitárias dos agregados utilizados.

Abertura das peneiras (mm)	Areia Fina	Areia Média	Brita 0	Brita 1
	Massa retida acumulada (%)			
25	0	0	0	0
19	0	0	0	0
12,5	0	0	0	71
9,5	0	0	0	93
6,3	0	1	21	100
4,75	0	2	57	100
2,36	0	2	93	100
1,18	0	12	98	100
0,6	1	32	99	100
0,3	7	91	99	100
0,15	91	99	99	100
Fundo	100	100	100	100
Diâmetro Máximo (mm)	0,6	2,36	9,5	19
Módulo de Finura	0,99	2,39	5,44	6,93
Massa Unitária (kg/dm ³)	1,39	1,55	1,55	1,53
Massa Específica (kg/dm ³)	2,62	2,62	2,82	2,81

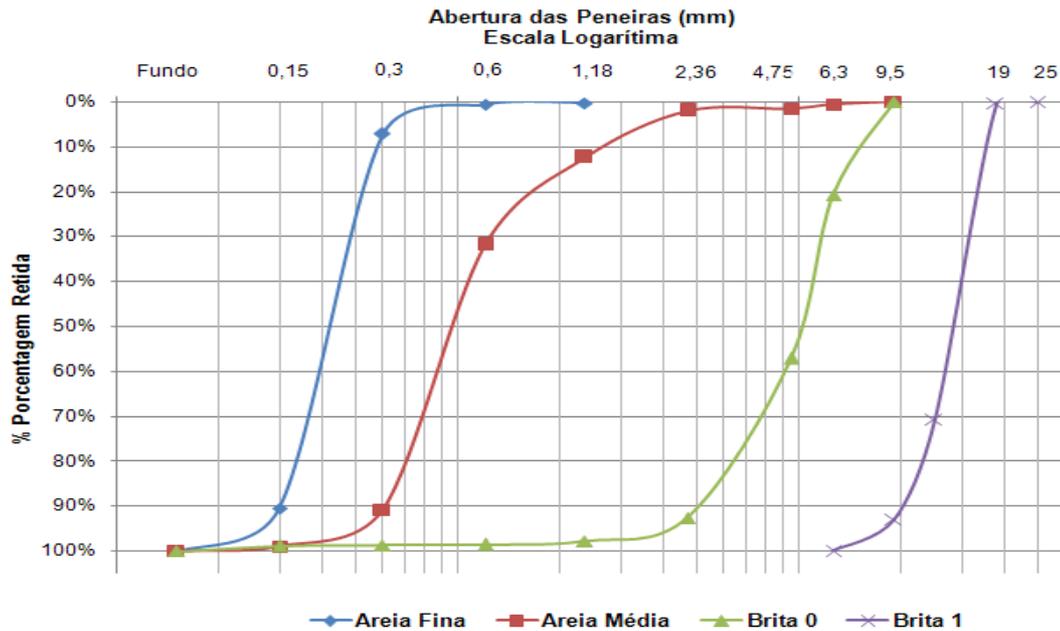


Figura 4.2: Gráfico da análise granulométrica dos agregados utilizados no trabalho.

4.3. Proporcionalamento dos agregados

4.3.1. Proporcionalamento dos agregados pelo procedimento de dosagem proposto na dissertação

4.3.1.1. Proporcionalamento entre os agregados miúdos

Para a combinação de agregados miúdos, primeiramente, determinou-se o índice de vazios para uma amostra com 100% de areia média e 0% de areia fina. Prosseguiu-se com a definição do índice de vazios para a combinação de 90% de areia média e 10% de areia fina, e assim, sucessivamente, com porcentagens de 10% de adição de areia fina e de 10% de subtração de areia média, até que se estabelecesse o índice de vazios para 100% de areia fina. Os percentuais de materiais calculados são em relação à massa total da mistura. A determinação do índice de vazios foi realizada com os materiais no estado solto, sem compactação e em um recipiente cilíndrico com 10 cm de diâmetro e com um volume de 0,628 dm³. A Tabela 4.6 apresenta os resultados dos índices de vazios para a mistura.

Tabela 4.6: Ensaio de compactação entre areia média e areia fina.

% de Areia Média	% de Areia Fina	Massa da Mistura (kg)	Massa Unitária Mistura (kg/dm ³)	Massa Específica Mistura (kg/dm ³)	Índice de Vazios (%)
100	0	0,903	1,44	2,62	45,15
90	10	0,933	1,48	2,62	43,32
80	20	0,935	1,49	2,62	43,20
70	30	0,954	1,52	2,62	42,05
60	40	0,945	1,50	2,62	42,60
50	50	0,923	1,47	2,62	43,93
40	60	0,912	1,45	2,62	44,60
30	70	0,892	1,42	2,62	45,81
20	80	0,878	1,40	2,62	46,66
10	90	0,852	1,36	2,62	48,24
0	100	0,829	1,32	2,62	49,64

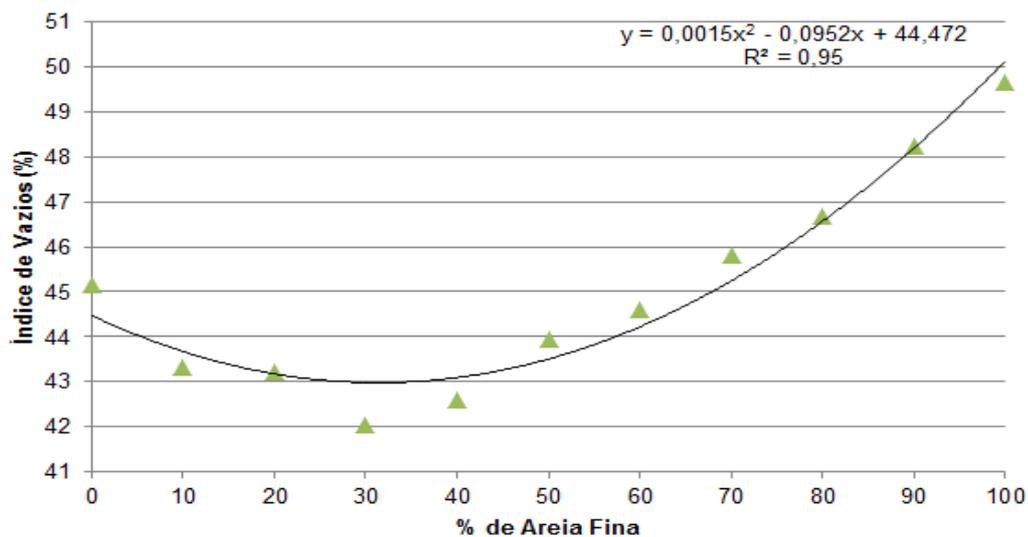


Figura 4.3: Composição de areia média e fina, e o índice de vazios.

Com o objetivo de determinar a melhor combinação dos agregados, através da análise da curva que melhor se ajustasse aos dados, definiu-se inserir uma curva de tendência polinomial de 2º grau, e determinar a equação do gráfico e o R^2 para verificar o ajuste da curva, conforme a Figura 4.3. A partir da equação da curva, foi possível encontrar o menor valor do índice de vazios das areias, através da derivação da equação e estabelecimento do valor que anula a equação derivada, conforme definido por Recena (2011a). O valor encontrado, foi 32% e optou-se por trabalhar com o valor de 30%. O R^2 , igual a 0,95 demonstra a correlação.

4.3.1.2. Proporcionamento entre os agregados graúdos

Para a determinação da melhor combinação entre brita 0 e brita 1, utilizou-se o procedimento prático para estimativa do teor de argamassa, do método empírico, denominado método CIENTEC de dosagem, conforme Recena (2011), também denominado método Alemão Simplificado, conforme Guimarães et al. (2007). Nesta etapa este procedimento foi utilizado para a combinação de agregados, no estado solto, que resultasse no menor índice de vazios. Esse último mensurado através da massa de água que preenche os vazios da mistura.

Dessa maneira, partiu-se da pesagem da massa de água que ocupou os vazios de uma determinada massa de agregados, com 100% de brita 1, e prosseguiu-se a medição da massa de água que ocupou os vazios da mistura de 90% de brita 1 e 10% de brita 0. As combinações seguiram-se, reduzindo 10% da brita 1 e aumentando 10% da brita 0, e medindo a massa de água que ocupava os vazios de cada mistura, até a pesagem da massa de água que ocupou os vazios de uma massa de agregados com 100% de brita 0. A massa de agregados utilizada nas combinações foi fixada em 3 kg. O recipiente utilizado tinha forma cilíndrica, com diâmetro de 20 cm, e o material não sofreu nenhum tipo de compactação. Utilizou-se de um nível de bolha para nivelção do prato metálico posicionado sob os agregados. Esse prato determinou o ponto em que deveria ser finalizada a adição da água na mistura, ou seja, verteu-se a água até tocar a superfície inferior do prato. A Figura 4.4 ilustra o equipamento empregado para o ensaio de compacidade.



Figura 4.4: Equipamentos empregados no ensaio de compactação.

É possível observar, através da Tabela 4.7 e da Figura 4.5, que as menores massas de água que ocupam os vazios da mistura de britas encontram-se na faixa com proporcionamento entre 35-55% de brita 0. Para obter o valor mais próximo da combinação ideal de brita 1 e brita 0, a com menor massa de água que preenche os vazios da mistura, definiu-se inserir uma curva de tendência polinomial de 2º grau, e definir a equação do gráfico e o R^2 para verificar o ajuste da curva. A partir da equação da curva, foi possível encontrar o menor valor da massa de água, através da derivação da equação e determinação do valor que anula a equação derivada, conforme definido por Recena (2011a). O resultado foi uma porcentagem de brita 0 na mistura de 44%. O valor da massa de água para a mistura de 70% de brita 0 e 30% de brita 1 foi extraído do gráfico devido à incoerência do resultado. O R^2 , igual a 0,83, foi considerado adequado.

Tabela 4.7: Ensaio de compactação entre brita 1 e brita 0.

% de Brita 1	% de Brita 0	Massa de Água (g)
100	0	863
90	10	773
80	20	785
70	30	754
60	40	759

50	50	750
40	60	782
30	70	*
20	80	834
10	90	812
0	100	896

*resultado excluído devido à incoerência do resultado.

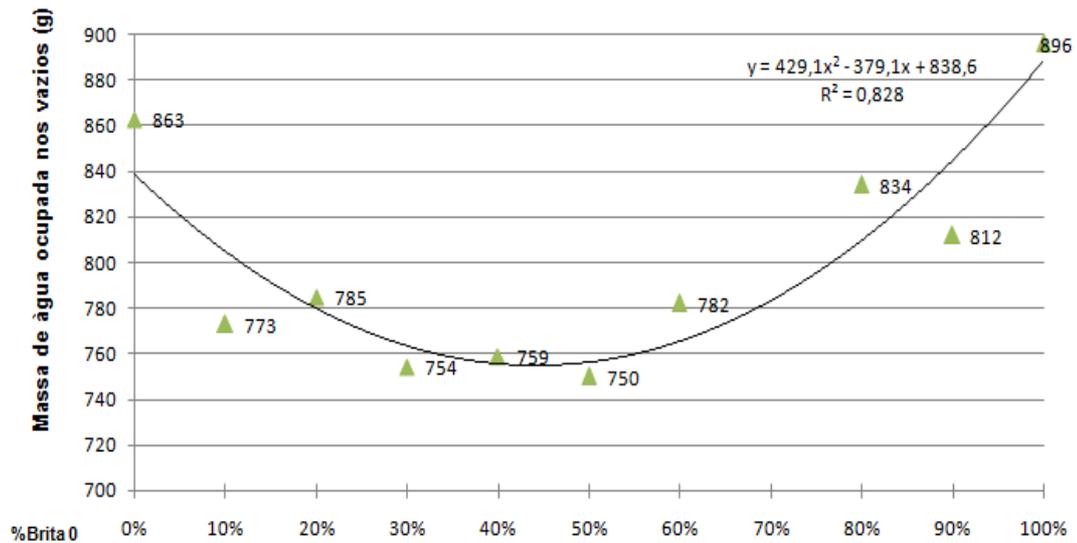


Figura 4.5: Combinação entre brita 1 e brita 0.

4.3.2. Proporcionamento dos agregados pelo método Tutikian e Dal Molin (2007)

Para o proporcionamento dos agregados utilizados na dosagem do CAA pelo método de Tutikian e Dal Molin (2007), foi utilizado o método de empacotamento, conforme definido por esses autores.

Iniciou-se com a combinação dos agregados graúdos (brita 1 e 0) e determinou-se o menor índice de vazios. Posteriormente, combinou-se a mistura das britas com areia média e fez-se a combinação com menor índice de vazios e, por fim, combinou-se a mistura de britas e areia média com areia fina, e novamente encontrou-se o menor índice de vazios. A melhor combinação entre os agregados foi sempre definida como aquela que apresentasse o menor índice de vazios.

O procedimento para mensurar a massa unitária compactada consistiu no lançamento dos agregados, dentro de um recipiente cilíndrico de 4,48 dm³ em três camadas. Cada camada recebeu 50 golpes (energia da queda do bastão a uma altura de 15 cm) da haste utilizada no ensaio de abatimento de tronco de cone para conferir a compactação da mistura. A parte superior do recipiente cilíndrico foi nivelada com a haste, retirando-se o excesso de material.

4.3.2.1. Combinação entre brita 1 e brita 0

A Tabela 4.8 mostra o resultado do empacotamento da brita 1 com a brita 0. Observa-se que a combinação que resultou no menor índice de vazios foi o de 70% de brita 1 e 30% de brita 0, com percentual de 38,7%. Esta proporção entre agregados graúdos foi utilizada para a próxima etapa de proporcionamento.

Tabela 4.8: Ensaio de compacidade entre brita 1 e brita 0.

% de Brita 1	% de Brita 0	Massa Unitária Compactada (kg/dm ³)	Massa Específica Mistura (kg/dm ³)	Índice de Vazios (%)
100	0	1,71	2,81	39,2
90	10	1,72	2,81	39,0
80	20	1,72	2,81	39,0
70	30	1,72	2,81	38,7
60	40	1,70	2,81	39,6
50	50	1,69	2,82	40,0
40	60	1,68	2,82	40,5
30	70	1,68	2,82	40,4
20	80	1,67	2,82	40,6
10	90	1,66	2,82	41,3
0	100	1,60	2,82	43,2

A Figura 4.6 apresenta o gráfico da variação do percentual de vazios em função combinação de britas. Observa-se que, nas primeiras 4 combinações, com substituição de até 30% de brita 0, praticamente não houve variação do índice de vazios, com o percentual variando entre 38,7% e 39,2%.

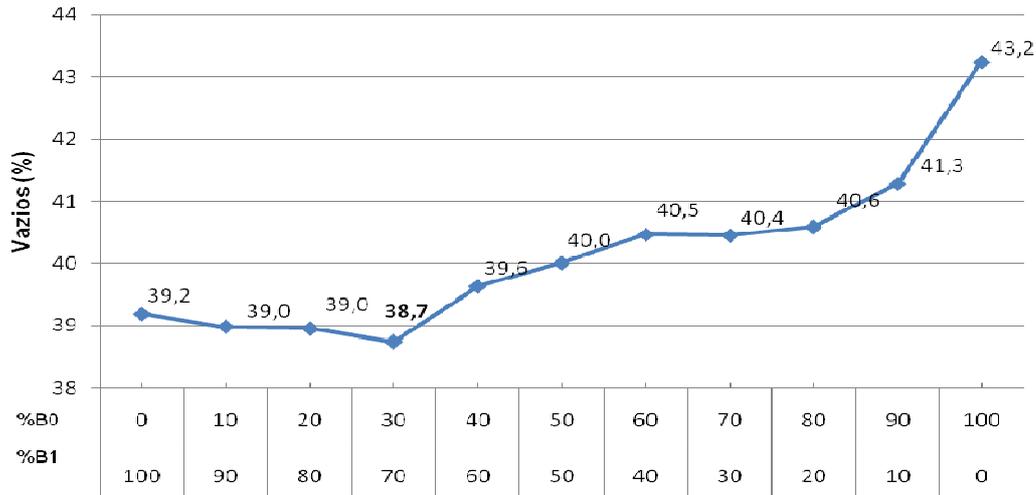


Figura 4.6: Índice de vazios da combinação entre brita 1 e brita 0.

4.3.2.2. Combinação entre areia média e a mistura de brita 1 e brita 0

Com base na Tabela 4.9 e na Figura 4.7, observa-se claramente que a mistura de 30% de areia média com 70% da mistura de britas é a que apresenta o menor índice de vazios, 23,6%. Esta combinação foi utilizada na próxima etapa de proporcionalamento.

Tabela 4.9: Ensaio de compacidade entre areia média e a mistura de brita 1 e brita 0.

% de Areia	% de Britas 1 e 0	Massa Unitária Compactada (kg/dm ³)	Massa Específica Mistura (kg/dm ³)	Índices de Vazios (%)
100	0	1,70	2,62	35,0
90	10	1,79	2,64	32,3
80	20	1,85	2,66	30,5
70	30	1,90	2,68	29,0
60	40	1,96	2,70	27,2
50	50	2,03	2,72	25,2
40	60	2,05	2,74	25,2
30	70	2,10	2,76	23,6
20	80	1,96	2,77	29,3
10	90	1,86	2,79	33,6
0	100	1,72	2,81	38,7

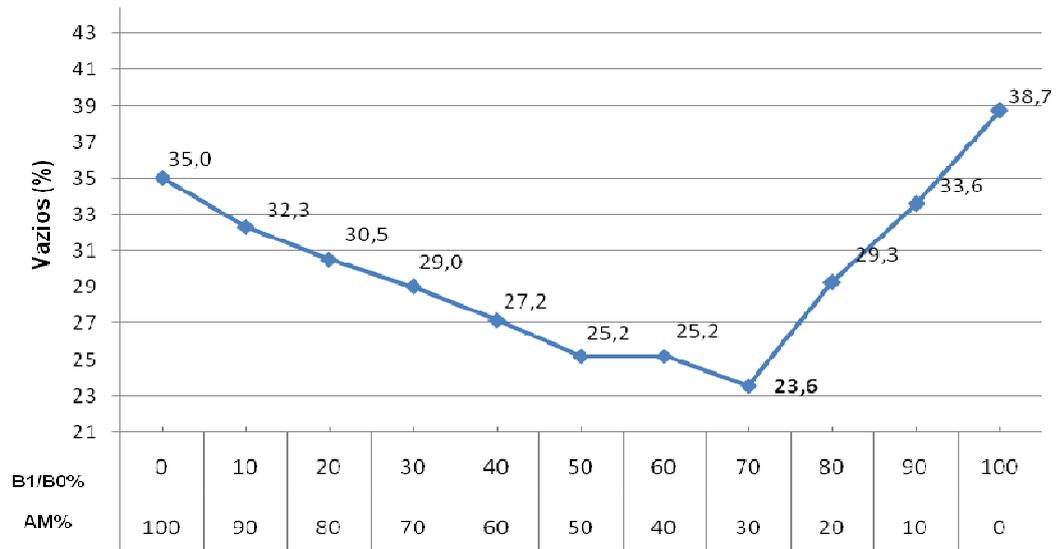


Figura 4.7: Índice de vazios da combinação entre areia média com a mistura de brita 1 e brita 0.

4.3.2.3. Combinação entre areia fina e a mistura de britas 1/0 e areia média

Observa-se, através da Tabela 4.10 e Figura 4.8, que o teor de 20% de areia fina e 80% da mistura (brita 1, brita 0 e areia média) proporcionou o menor índice de vazios, 20,9%. Estas proporções entre agregados foram as utilizadas na definição do esqueleto granular para a dosagem do CAA pelo método de Tutikian e Dal Molin (2007).

Tabela 4.10: Ensaio de compacidade entre areia fina e a mistura de brita 1, brita 0 e areia média.

% de Areia Fina	% de Britas 1/0 e Areia Média	Massa Unitária Compactada (kg/dm ³)	Massa Específica Mistura (kg/dm ³)	Índices de Vazios (%)
100	0	0	0	-
90	10	0	0	-
80	20	0	0	-
70	30	0	0	-
60	40	0	0	-
50	50	0	0	-
40	60	0	0	-
30	70	2,06	2,72	24,1
20	80	2,16	2,73	20,9
10	90	2,16	2,74	21,2
0	100	2,11	2,76	23,5

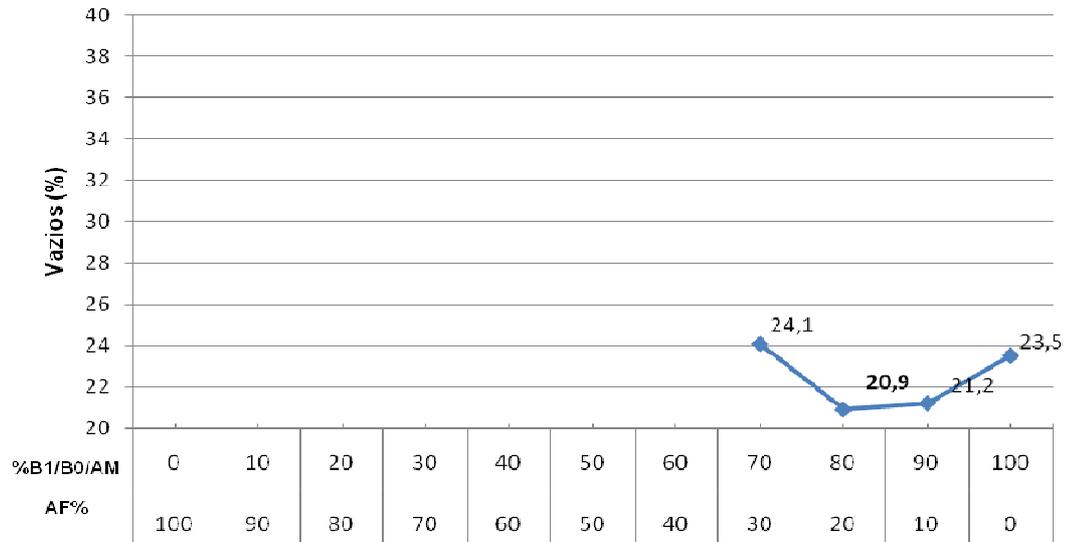


Figura 4.8: Índice de vazios da combinação entre areia fina com a mistura de brita 1, brita 0 e areia média.

4.3.3. Proporcionamento dos agregados pelo método Alencar e Helene (2006)

Conforme definido por Alencar e Helene (2006), a combinação ótima entre agregados graúdos é definida como aquela que resulte no maior empacotamento e com o menor índice de vazios. Entretanto, nos trabalhos de Alencar (2008) e Alencar e Helene (2006) não está claro se a mistura de agregados dá-se de forma compactada, como em Tutikian e Dal Molin (2007). Desta maneira, levou-se em consideração o método de Helene e Terzian (1992) para concreto convencional, que faz a combinação de agregados graúdos de maneira compactada. Como os materiais empregados em todos os concretos são os mesmos, utilizou-se da proporção obtida no item 4.3.2.1., 70% de brita 1 e 30% de brita 0.

Em relação aos agregados miúdos, a quantidade de substituição da areia média por areia fina, chamada de teor de substituição (T), foi definida experimentalmente durante a fase de proporcionamento e varia para cada traço-base, conforme definido no item 3.6.10.

4.4. Dosagem dos concretos

4.4.1. Dosagem do CAA e do concreto convencional pelo procedimento proposto no trabalho

A definição do teor adequado de argamassa seca foi realizada para cada traço-base (1:3, 1:4,5 e 1:6) e fez-se o seguinte procedimento: a partir do cálculo do teor de argamassa seca para o concreto convencional conforme definido por Recena (2011), que resultou no valor de 43%, detalhado no Anexo A, iniciou-se o teste experimental. Partiu-se de um volume de aproximadamente 11 litros de concreto, com o proporcionamento dos materiais definidos anteriormente e sem a utilização de aditivos, e somente com a adição de água no concreto. Objetivou-se, assim, atingir um abatimento do tronco de cone com 250 ± 20 mm sem ocorrência de segregação ou perda de coesão. Caso ocorresse segregação ou perda de coesão antes de se atingir o abatimento definido, o teor de argamassa era corrigido com um aumento de 2%, e novamente era adicionado água com o objetivo de atingir o abatimento definido. A adição de água tem o objetivo de simular a adição de SP e, assim, estimar o teor de argamassa seca mínimo, e, conseqüentemente, um teor de finos mínimo necessário para manter a mistura estável (com coesão e resistência à segregação). Sabe-se que o efeito do SP e da água sobre o concreto, mais especificamente sobre a viscosidade, diferem sensivelmente. Contudo, se a mistura for estável após a adição da água, essa muito provavelmente será estável, além de apresentar uma maior fluidez, após a adição do SP²³.

²³Segundo Zerbino e Barragán (apud ALENCAR, 2008, p.48) o efeito do conteúdo da água e do SP sobre os parâmetros reológicos do concreto, mais especificamente sobre a tensão de escoamento e a viscosidade, são: redução da tensão de escoamento com o aumento do conteúdo tanto da água quanto do SP, e redução drástica da viscosidade da mistura no caso do aumento do conteúdo de água, e uma redução da viscosidade bem menos acentuada no caso do aumento de conteúdo do SP.

Os teores de argamassa seca encontrados para cada traço foram diferentes, porém muito próximos, 51%, 52% e 53%. A planilha utilizada no teste experimental do traço rico 1:3 encontra-se na Tabela A.1 do Anexo. Ao final, foi acrescentado ao valor de argamassa encontrado 2% para absorver perdas durante a realização dos testes de trabalhabilidade. Helene e Terzian (1992) sugerem incrementos a partir deste valor para absorver perdas de argamassa durante o processo de transporte e lançamento. Assim, os teores apropriados de argamassa seca, para os traços 1:3, 1:4,5 e 1:6, foram respectivamente 53%, 54% e 55%.

Determinado o teor apropriado de argamassa seca para cada traço-base, partiu-se para a dosagem do concreto. Após a adição e mistura dos componentes do concreto e antes da adição do SP na mistura, foi realizado ensaio de abatimento do tronco de cone e moldados 8 CPs, para cada traço-base. Esse concreto foi definido, neste trabalho, como concreto convencional de referência. A massa de concreto retirada da betoneira para moldagem destes CPs foi pesada para realizar o cálculo da relação SP/c do CAA (concreto que permaneceu na betoneira). Nota-se que a comparação entre o CAA e o concreto convencional tornou-se mais adequada já que, exatamente, as mesmas condições, materiais e proporções foram mantidas na dosagem do CAA e do concreto convencional. Novamente, ressalta-se que a única diferença entre a dosagem do concreto convencional de referência e o CAA é a utilização de SP.

A betoneira utilizada, conforme Figura 4.9, para a dosagem de todos os concretos, foi do tipo eixo vertical, cuja capacidade é de 100 litros. A sequência de colocação de materiais na betoneira seguiu a seguinte ordem: areia média + cimento (mistura) + areia fina (mistura) + 80% da água (mistura) + agregado graúdo (mistura) + restante da água (mistura) + adição do SP direto no concreto sem diluição em água. O tempo de mistura total do concreto variou entre 6 e 10 minutos. O aditivo plastificante foi todo diluído nos primeiros 80% da água.

Os procedimentos e sequências de mistura agem com grande influência nas características do CAA, conforme Skarendahl (2006) e Takada (apud Manuel, 2005, p.89).

Outro fato importante foi a realização do ensaio de abatimento do tronco de cone antes da adição do SP na mistura, que, além de caracterização do concreto convencional de referência, foi utilizado como parâmetro de dosagem. Este valor de consistência foi definido em 125 ± 20 mm, e foi adotado para todos os demais métodos de dosagem.



Figura 4.9: Betoneira utilizada para todas as dosagens.

4.4.2. Dosagem do CAA pelo método Tutikian e Dal Molin (2007)

Conforme definido pelo método Tutikian e Dal Molin (2007), de posse das proporções entre os agregados, conforme definido nos itens 4.3.2.1, 4.3.2.2 e 4.3.2.3, que serão constantes para todos os concretos, definiu-se a quantidade de cimento para os traços 1:3, 1:4,5 e 1:6. Observa-se que o teor de argamassa seca é definido conforme proporcionamento dos agregados e da relação cimento/materiais secos, não sendo realizado, a princípio, nenhum tipo de teste experimental para verificação do teor ideal de argamassa do concreto. Além disso, verifica-se que o teor de argamassa seca não é constante, variando de 52%, para o traço mais pobre, até 58%, para o traço mais rico.

O primeiro traço produzido foi o intermediário e, a partir da dosagem de SP para ele, definiu-se a relação SP/c para os demais traços, conforme recomendação do método e de Manuel (2005). A dosagem do SP no traço intermediário foi a máxima possível, avaliada através da inspeção visual do concreto dentro da betoneira, quando ocorresse uma leve segregação da mistura, identificada pela pouquíssima presença ou inexistência de brita no filme superior do concreto.

A sequência de colocação de materiais na betoneira e o tempo de mistura seguiram os mesmos procedimentos do método de dosagem anterior, como comentado no item 4.4.1.

4.4.3. Dosagem do CAA pelo método Alencar e Helene (2006)

A sequência de dosagem seguiu a recomendação de Alencar (2008), conforme figura 3.29, do item 3.6.10. Iniciou-se com a dosagem do traço intermediário (1:4,5) com um teor de argamassa seca de 53% e um teor de substituição da areia média por areia fina, de 20%. Da mesma maneira como foi feito na dosagem pelo método de Tutikian e Dal Molin (2007), a dosagem do SP foi a máxima possível avaliada através da inspeção visual do concreto dentro da betoneira.

Nesta primeira tentativa de dosagem, ocorreu bloqueio do concreto nas barras de aço no ensaio da caixa L, na etapa de verificação, possivelmente demonstrando falta de argamassa e baixo teor de substituição (T). Utilizou-se, então, de um teor de argamassa seca de 56% e um teor de substituição de 10%. Contudo, novamente, ocorreu o bloqueio no ensaio da caixa L. O teor de substituição foi elevado para 15% e, posteriormente, para 20%, reincidindo a ocorrência do bloqueio. A dosagem de SP foi sempre mantida no limite da segregação e a relação a/c mantida próxima dos traços intermediários dos demais métodos de dosagem.

Elevou-se o teor de argamassa seca para 59% e o teor de substituição partiu de 20%, que foi elevado primeiramente para 25% e, posteriormente, para 30%. Com

este último valor, pôde-se atingir uma relação HP maior ou igual a 0,80, dentro dos limites estabelecidos da classe PL2, conforme a ABNT NBR 15823-1, 2010.

Definido os valores do teor de argamassa seca, que deve ser utilizado para todos os traços da mesma família conforme preconiza o método, e de substituição do traço intermediário, realizou-se nova dosagem do traço intermediário e verificações para assim, de posse desses dados, realizar as futuras análises. Durante a dosagem do traço rico e pobre encontrou-se os teores de substituição do traço rico e pobre, que resultaram nos valores de 20% e 40%, respectivamente.

A sequencia de colocação de materiais na betoneira e o tempo de mistura seguiram os mesmos procedimentos dos demais métodos de dosagem. Como comentado no item 4.4.1, também aqui, utilizou-se o critério de partir de um resultado de abatimento do tronco de cone de 125 ± 20 mm.

Alencar (2008) sugere a utilização de 5 traços-base para a construção do diagrama e cálculo das equações de correlação, contudo o experimento utilizou 3 traços-base, conforme anteriormente comentado, com o intuito de padronizar as comparações com os demais métodos, que permitem a utilização dessa quantidade.

5. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Neste capítulo os resultados dos ensaios no estado fresco e endurecido do concreto serão apresentados, assim como as comparações entre os CAAs dosados pelos métodos de Tutikian e Dal Molin (2007), Alencar e Helene (2006), e o CAA e o concreto convencional dosados neste trabalho.

5.1. Comportamento no estado fresco

Conforme definido no programa experimental, no item 4.1, para avaliação da trabalhabilidade do concreto convencional foi utilizado o ensaio de abatimento do tronco de cone, conforme norma ABNT NBR NM 67, 1998, e, para os CAAs, foram utilizados os ensaios de espalhamento, tempo de escoamento (t_{500}), caixa L, funil V e segregação respectivamente, conforme ABNT NBR 15823-2, 2010; ABNT NBR 15823-4, 2010; ABNT NBR 15823-5, 2010 e ABNT NBR 15823-6, 2010.

5.1.1. Ensaio de trabalhabilidade do concreto convencional

A Tabela 5.1 apresenta os resultados de abatimento do tronco de cone do concreto convencional dosado e identificado neste trabalho através da sigla CCV-R.

Tabela 5.1: Resultado do ensaio de abatimento do tronco de cone do CCV-R para cada traço-base.

m	Abatimento (mm)
3	130
4,5	125
6	115

5.1.2. Ensaios de trabalhabilidade dos CAAs: procedimento do trabalho, método Tutikian e Dal Molin (2007) e método Alencar e Helene (2006)

A Tabela 5.2 apresenta o quadro resumo, identificando os concretos dosados pelos diferentes métodos com seus respectivos valores de teor de argamassa seca (α), de dosagem de SP e com os resultados dos ensaios de trabalhabilidade. Ainda na Tabela 5.2 são apresentadas as siglas dos concretos: CAA-R é o concreto autoadensável dosado, conforme procedimento deste trabalho; CAA-TD é o concreto autoadensável dosado conforme método de Tutikian e Dal Molin (2007); CAA-AH é o concreto autoadensável dosado, conforme método de Alencar e Helene (2006).

Tabela 5.2: Resultado dos ensaios de trabalhabilidade para os CAAs dosados pelos 3 métodos.

Concreto	α (%)	m	Abat.*	SP %***	Espalhamento (mm)	t_{500} (s)	Caixa L**** (H2/H1)	Funil V (s)	Coluna de Segregação (%)
CAA-R	53	3	130	0,27	660	1,6	0,85	4,2	1
CAA-R	54	4,5	125	0,49	740	1,3	0,93	3,5	11
CAA-R	55	6	115	0,52	680	1,9	0,86	3,2	20
CAA-TD	58	3	105	0,39	750	1,7	0,95	4,5	8
CAA-TD	54	4,5	145	0,39	630	2,4	0,90	3,8	3
CAA-TD	52	6	120**	0,39	600	0,9	0,81	1,9	0
CAA-AH	59	3	130	0,38	630	1,4	0,90	5,1	19
CAA-AH	59	4,5	125	0,38	660	1,6	0,90	3,2	3
CAA-AH	59	6	105**	0,38	570	0,5	0,75	1,7	9

*abatimento medido antes da adição do SP.

**após a adição do SP foi adicionado mais água para atender a trabalhabilidade desejada.

***porcentagem sobre a massa de cimento.

****ensaio realizado com 3 barras.

Conforme Figura 5.1, em relação aos resultados de espalhamento, verifica-se que todos os métodos apresentaram valores dentro do que havia sido objetivado no item 4.1, ou seja, com resultado mínimo dentro dos limites da classe SF1, conforme ABNT NBR 15823-1, 2010. Verifica-se também um baixo resultado de espalhamento nos traços pobres (1:6) para os concretos CAA-TD e CAA-AH. Nestes concretos, onde a relação SP/c é mantida constante para todos os traços-base da mesma família, a quantidade de SP, aparentemente, foi insuficiente para manter a trabalhabilidade do concreto com traço pobre próxima ao do traço intermediário. Importante salientar que estes dois concretos, com traço 1:6, sofreram a adição de

um conteúdo relativamente grande de água, quando comparados com o CAA-R, e, mesmo assim, apresentaram baixo resultado de espalhamento. Já, para o traço 1:6 do concreto CAA-R, nota-se um resultado mais alto de espalhamento, além de um a/c menor (conforme Tabela 5.3), em comparação com os outros concretos, aparentemente devido a uma maior adição de SP em relação ao cimento.

Em relação ao traço rico e pobre do CAA-R, deve-se salientar que a dosagem de SP/c foi variável para cada traço-base, apresentando assim uma maior flexibilidade e controle do resultado do espalhamento. A Figura 5.2 ilustra o ensaio de espalhamento.

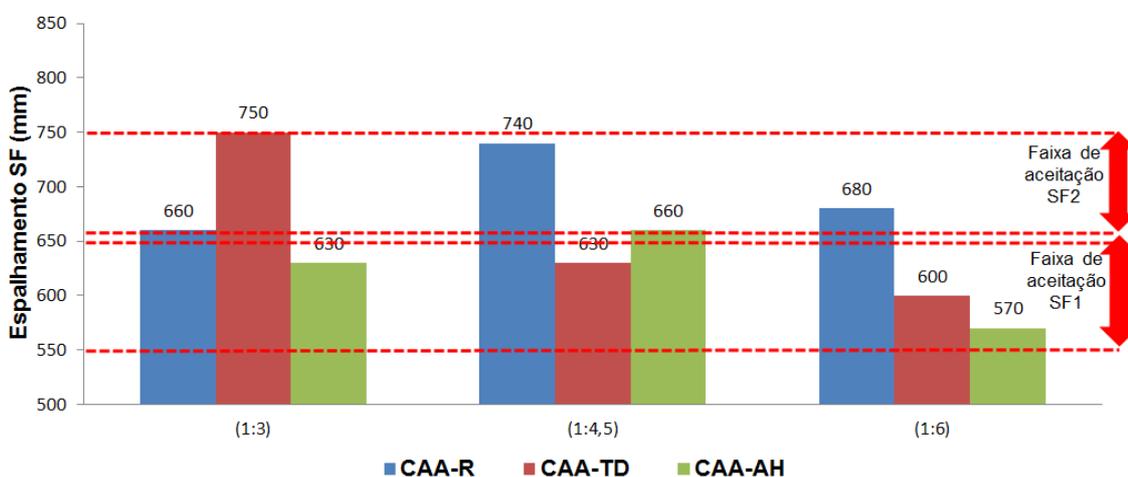


Figura 5.1: Resultados do ensaio de espalhamento (mm) para os 3 métodos de dosagem.



(A)



(B)

Figura 5.2: Ensaio de espalhamento do CAA-R traço 1:3 (A) e ensaio de espalhamento do CAA-R traço 1:6.

A Figura 5.3 apresenta os resultados de tempo de escoamento t_{500} , em segundos, para os concretos dosados. O resultado desse ensaio, conforme a ABNT NBR 15823-1, 2010, avalia a viscosidade plástica aparente do concreto. Somente o CAA-TD do traço intermediário apresentou resultado fora da classe VS1 estipulada neste trabalho. Os traços 1:3 e 1:4,5, de todos os concretos dosados, apresentaram valores muito próximos, entre 1,3 e 1,6 segundos, com exceção do CAA-TD do traço intermediário, que resultou em 2,4 segundos, já comentado. Os resultados dos traços pobres 1:6, menos viscosos em função da redução do volume de pasta de cimento, foram os que apresentaram as maiores diferenças em relação aos demais traços e entre os traços pobres dos diferentes métodos. Os valores baixos de t_{500} para os concretos CAA-TD e CAA-AH no traço 1:6 demonstraram a baixa viscosidade plástica aparente das misturas provavelmente devido à insuficiente dosagem SP/c, à grande quantidade de areia fina e à grande quantidade de água adicionada, conforme traço unitário apresentado na Tabela 5.3. A água foi acrescida na tentativa de se obter melhores resultados nos ensaios de espalhamento e principalmente da caixa L. O traço 1:6 do CAA-R, ao contrário do CAA-TD e CAA-AH, apresentou um alto valor de t_{500} , provavelmente devido a maior dosagem de SP/c e ao menor conteúdo de água adicionada, em comparação aos outros concretos. Nota-se também que o CAA-TD e o CAA-AH do traço 1:6 foram os concretos que receberam maior quantidade de areia fina, com objetivo de melhorar a coesão. Contudo, em conjunto com a adição de água, esta maior quantidade de areia fina reduziu a viscosidade aparente plástica do ensaio.

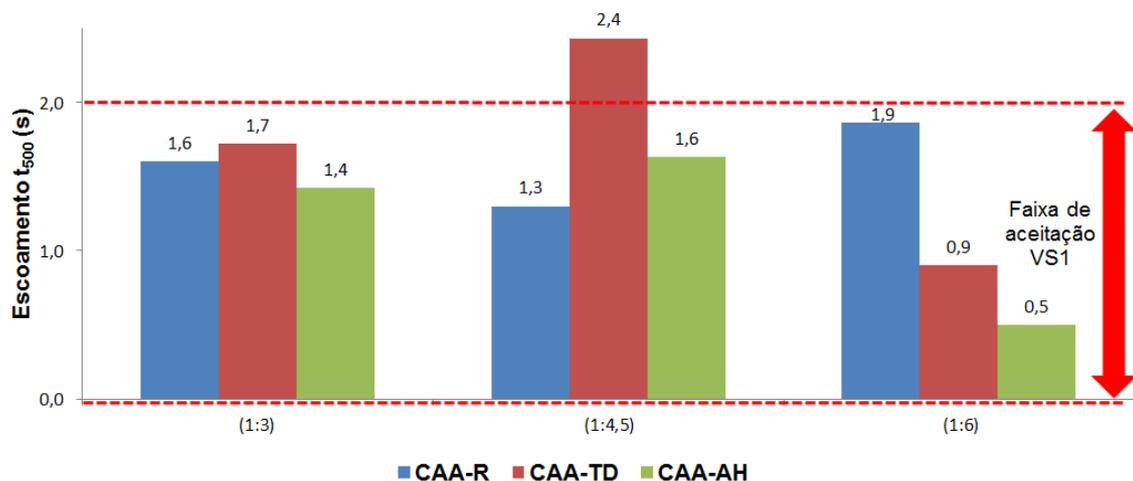


Figura 5.3: Resultados do ensaio de escoamento t_{500} (s) para os 3 métodos de dosagem.

No ensaio da caixa L, conforme Figura 5.4, verifica-se que somente o CAA-AH do traço 1:6 teve resultado fora da faixa de aceitação da classe PL2. Constatase também que os concretos do traço rico e do traço intermediário tiveram resultados variando entre 0,85 e 0,95. Todos os CAAs do traço 1:6 apresentaram os resultados mais pobres, próximos ao limite inferior da faixa de aceitação. O CAA-R foi o concreto, desse traço, com melhor resultado (HP igual a 0,86), provavelmente em virtude da maior dosagem do SP/c, em comparação com os outros concretos. A Figura 5.5 ilustra o ensaio.

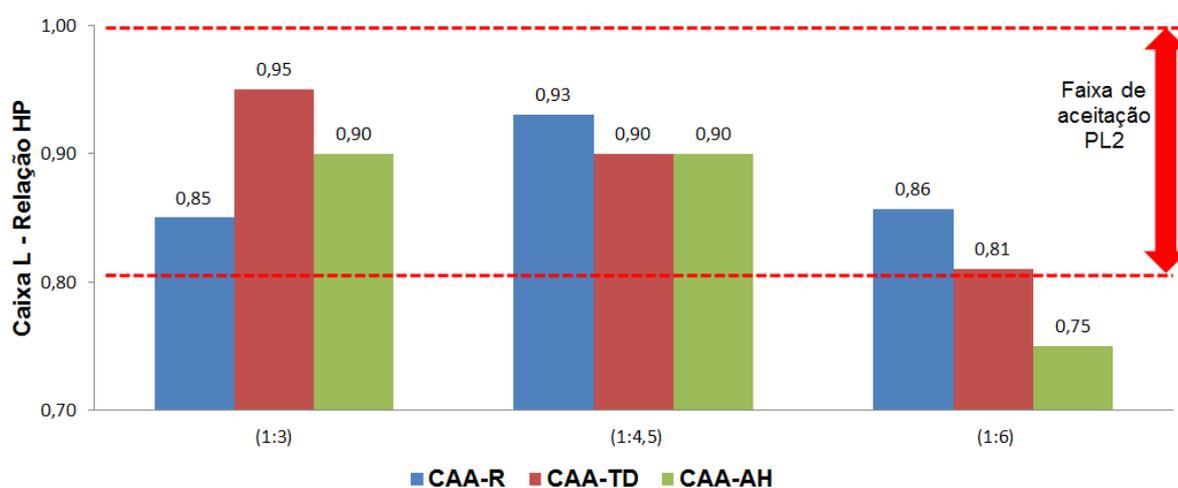


Figura 5.4: Resultados do ensaio da caixa L, relação HP, para os 3 métodos de dosagem.



Figura 5.5: Ensaio da caixa L do CAA-R traço 1:4,5.

Na Figura 5.6, assim como ocorreu no ensaio de tempo de escoamento t_{500} , os resultados do traço 1:6 nos concretos CAA-TD e CAA-AH foram os que apresentaram as maiores diferenças em relação aos demais traços. Fato esperado já que, conforme a ABNT NBR 15823-1, 2010, tanto o ensaio de escoamento, quanto o de funil V, avaliam a viscosidade plástica aparente. Pode-se dizer que os maiores resultados de funil V ocorreram no traço 1:3 pela maior presença de cimento (finos) e, conseqüentemente, de SP na mistura. Todos os resultados ficaram dentro da faixa de aceitação VF1. A Figura 5.7 ilustra a execução do ensaio.

A relação entre o t_{500} e o tempo do funil V foi verificada por Zerbino et al. (2009) que, produzindo CAAs com materiais similares, encontraram relações diretas desses resultados mesmo quando ocorria a variação da temperatura do concreto, da energia de mistura ou, no decorrer do tempo, após a mistura do concreto.

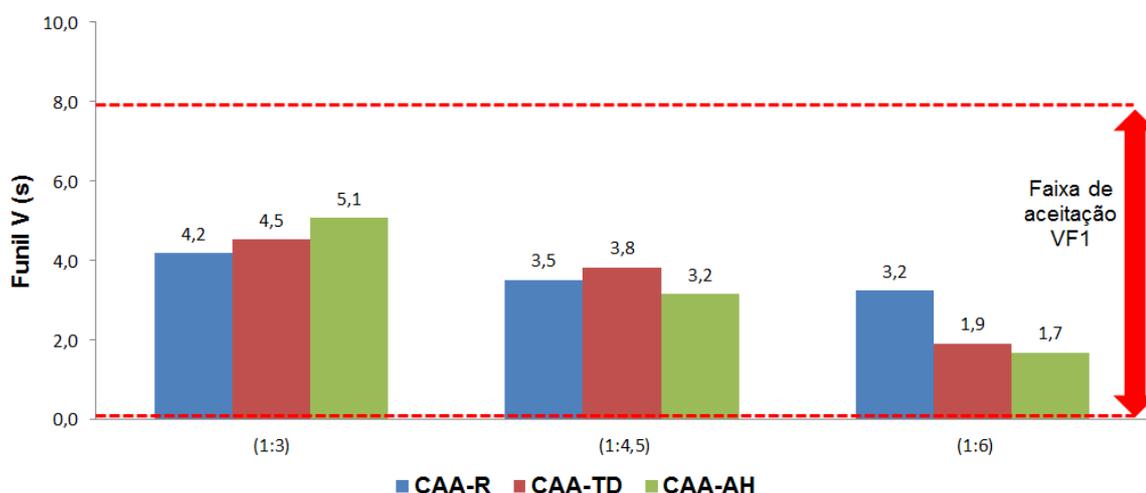


Figura 5.6: Resultados do ensaio funil V (s) para os 3 métodos de dosagem.

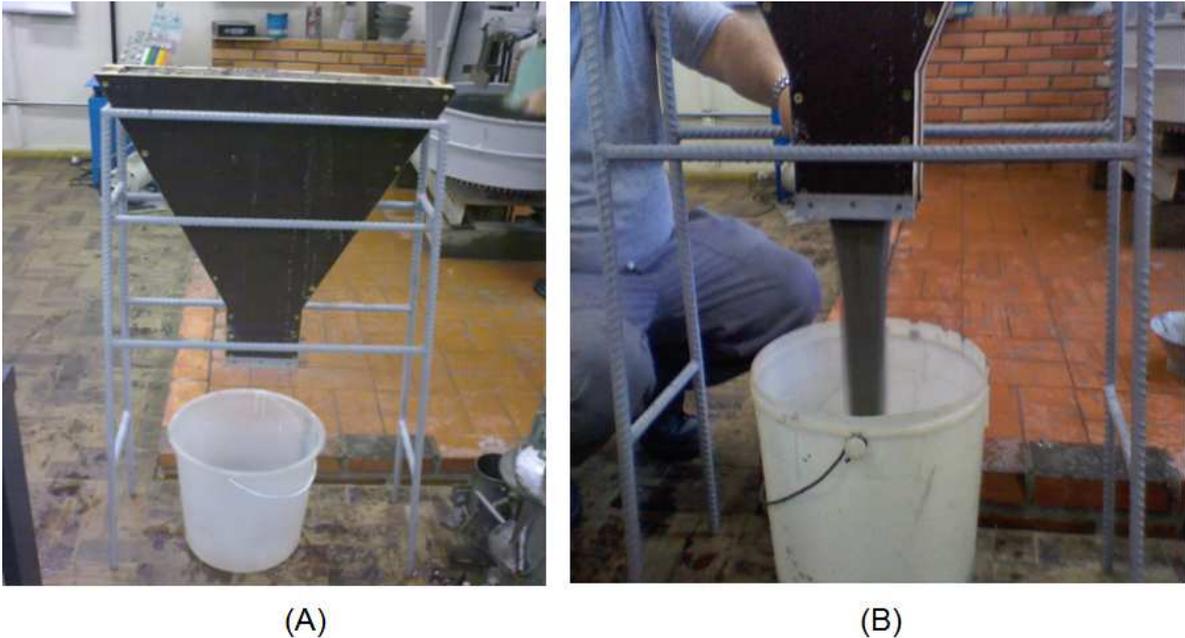


Figura 5.7: Ensaio funil V do CAA-R com equipamento preenchido com concreto (A) e após a abertura da porta.

Por fim, avalia-se o ensaio de segregação, na Figura 5.8, que apresentou resultados diferentes dentro e entre os traços-base dos diferentes concretos. No traço intermediário (1:4,5), a segregação, aparentemente, foi função da dosagem de SP/c e da quantidade de areia fina por m^3 . O CAA-R, o concreto com maior segregação, recebeu a maior dosagem de SP/c, 0,49%, enquanto dos demais o CAA-TD e CAA-AH receberam 0,39% e 0,38%, respectivamente. Conforme a Tabela 5.4, a quantidade de cimento por m^3 manteve-se próxima para todos os concretos de mesmo traço, mas a menor quantidade de areia fina por m^3 do CAA-R pode ter contribuído para uma maior segregação.

No traço pobre (1:6), a maior segregação novamente foi no CAA-R, que apresenta maior dosagem de SP/c e menor consumo de areia fina por m^3 em comparação com os outros concretos. O CAA-TD, concreto com maior quantidade de areia fina por m^3 , conforme Tabela 5.4, não apresentou segregação, demonstrando o efeito do enriquecimento da mistura com a utilização de areia fina e do empacotamento.

No traço rico (1:3), o CAA-AH foi o concreto que apresentou a maior segregação, a dosagem do SP para este traço, igual a 0,38%, foi próxima ao do

CAA-TD de 0,39% e maior do que a do CAA-R de 0,27%. Aparentemente, a maior segregação foi devida a menor quantidade de areia fina, acompanhada por uma dosagem de SP alta. Já o traço 1:3 do CAA-TD foi o com menor segregação e foi o que apresentou maior quantidade de areia fina por m³.

Aparentemente, houve a contribuição da areia fina no controle de segregação, conforme definido pelos métodos de dosagem Tutikian e Dal Molin (2007) e Alencar e Helene (2006) que estabelecem a substituição da areia média por material de maior área específica, neste caso, areia fina. No caso do CAA-TD, a técnica de empacotamento que resulta, neste caso, em uma quantidade elevada de areia fina por m³, aparentemente, controlou a segregação. Dentre os nove concretos dosados, o CAA-AH do traço 1:3 e o CAA-R do traço 1:6 resultaram em segregação superior ao limite de 15% da classe SR2.

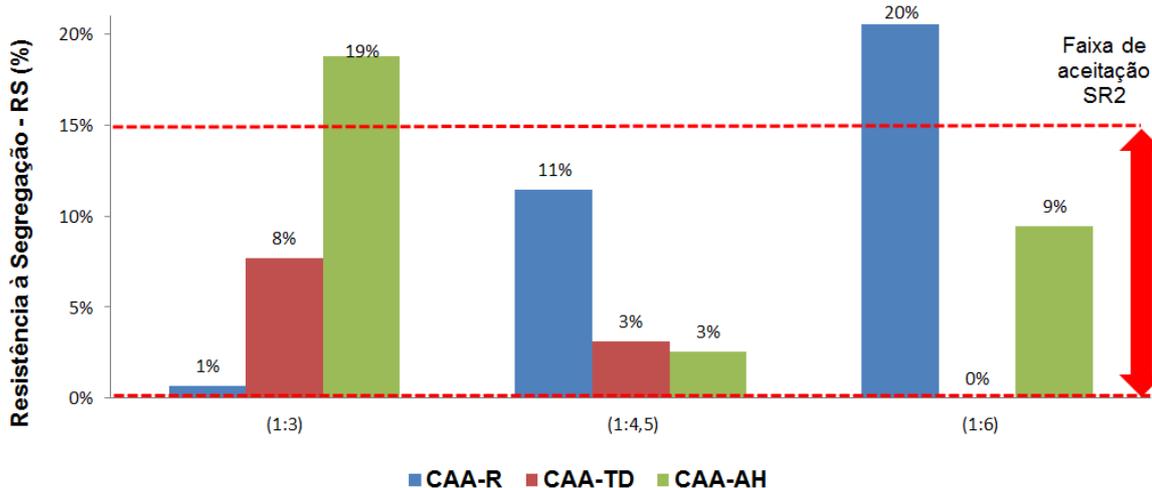


Figura 5.8: Resultados do ensaio de segregação, RS (%), para os 3 métodos de dosagem.

5.2. Diagramas de dosagem

Neste item, são apresentados os diagramas de dosagem, baseados no modelo do IPT/EPUSP de Helene e Terzian (1992), para os CAAs e o concreto convencional dosados.

Nas Figuras 5.10 e 5.11 foram representados, respectivamente, o diagrama de dosagem para o CCV-R e o CAA-R. Em ambos os diagramas, foi inserido um novo quadrante, relacionando o consumo teórico de cimento por m^3 de concreto (C) com o teor de argamassa seca da mistura, quadrante esse que já havia sido proposto por Tutikian (2007). No diagrama do CAA-R, foi inserido um segundo, relacionando o C com a dosagem de SP/c (relação essa já utilizada por Hartmann e Helene (2003) em estudo comparativo de aditivos).

Nas Figuras 5.12 e 5.13, foram graficados, respectivamente, os diagramas de dosagem para o CAA-TD e o CAA-AH. O primeiro acrescenta, em relação ao diagrama de Helene e Terzian (1992), o quadrante que relaciona C com o teor de argamassa seca, e, o último, acrescenta ao diagrama o quadrante que relaciona a porcentagem de substituição (T) com o m, conforme definido por esses métodos de dosagem.

Por fim, a Figura 5.14 ilustra todos os quatro concretos em um mesmo diagrama de dosagem para melhor comparação entre eles (o quadrante do T , desenvolvido por Alencar e Helene (2006), foi extraído desta figura).

Na Figura 5.10, onde é apresentado o diagrama de dosagem do CCV-R, nota-se que, conforme o conceito de dosagem descrito neste trabalho, o teor de argamassa seca é variável em função do C de cada traço. Os traços mais pobres, com menor quantidade de cimento e, conseqüentemente, de pasta, necessitam de um maior teor de argamassa seca para garantir a coesão e plasticidade da mistura. O diagrama de dosagem do CAA-TD, conforme Figura 5.12, apresenta também um quadrante para o teor de argamassa variável, contudo, nesse método, a argamassa variável é resultado do empacotamento da mistura, e, em oposição ao defendido

neste trabalho, os traços mais pobres do CAA-TD demonstram ser sempre menos argamassados que os traços mais ricos.

No diagrama de dosagem do CAA-R, conforme Figura 5.11, verifica-se um ajuste da curva exponencial de menor precisão, e, conseqüentemente, um R^2 menor, em comparação com as curvas dos demais concretos. Acredita-se que a ocorrência de um alto nível de segregação do traço pobre (1:6) desse concreto, igual a 20%, reduziu a resistência à compressão do concreto, prejudicando, assim, o ajuste da curva. Esse pressuposto é sustentado considerando-se a menor resistência à compressão desse traço pobre em comparação com o traço pobre do CCV-R, que apresenta o mesmo traço, com a única diferenciação da adição do SP. Analisa-se, ainda, que essa redução de resistência não ocorreu nos demais traços, nos quais as resistências à compressão do CAA-R foram maiores em relação as do CCV-R. Outro fato importante é que não foi verificado visualmente a segregação do concreto nos CPs seccionados do CAA-R de traço pobre, técnica utilizada por Manuel (2005), apesar do ensaio de segregação e os resultados de resistência a compressão indicarem este comportamento. Este fato pode indicar a importância do ensaio de segregação normalizado e a dificuldade de uma avaliação visual dos efeitos da segregação no CP. A Figura 5.9 apresenta os CPs do CAA-R de traço pobre seccionados.

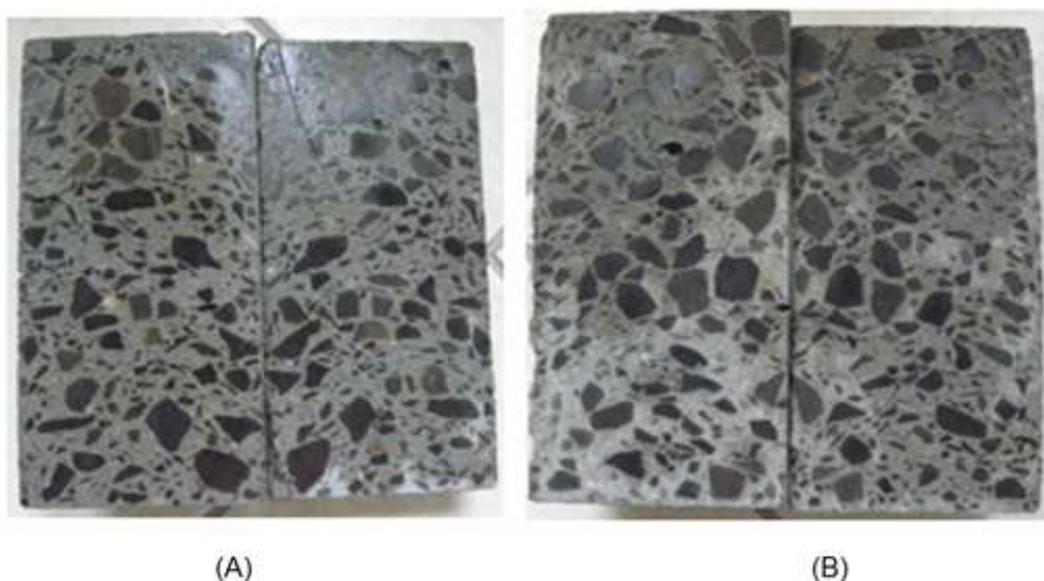


Figura 5.9: CPs seccionados (A e B) do CAA-R de traço pobre (1:6).

A razão de maiores resistências do CAA-R comparadas ao CCV-R, no traço intermediário e rico, pode ser explicada pelo efeito dispersante do SP sobre as partículas de cimento, melhorando a hidratação do cimento.

No diagrama de dosagem do CAA-R também foi inserido um quadrante relacionando o C com a dosagem do SP/c. Nota-se que misturas mais ricas, com maior quantidade de cimento, necessitam de menores dosagens de SP/c para se atingir uma determinada trabalhabilidade e, ao contrário, misturas mais pobres, com menor quantidade de cimento, necessitam de maiores dosagens de SP/c para se atingir esta mesma trabalhabilidade, conforme Alves e Helene (1994).

Na Figura 5.14, visualiza-se o deslocamento no sentido anti-horário da equação que relaciona a relação a/c com o m do CAA-TD e CAA-AH, em comparação com CCV-R e com o CAA-R, em razão de uma maior relação a/c para o m = 6. Nota-se também que a relação água/materiais secos totais (H) dos traços pobres desses concretos resultou bem mais alto que os demais pontos, prejudicando o resultado do R² conforme a Tabela 5.3 e 5.5. Como comentado anteriormente, os traços pobres desses concretos necessitaram receber uma adição relativamente grande de água a fim de atingir uma trabalhabilidade próxima ao especificado no início deste trabalho. Conforme esse diagrama, no CAA-R, ao contrário do CAA-TD e CAA-AH, a dosagem do SP/c é variável em função da quantidade de cimento.

Nota-se, também, a partir da análise da mesma figura, que, no traço rico e principalmente no traço intermediário, ocorreram diferenças relativamente grandes nos resultados de resistência à compressão entre os diferentes concretos, mesmo esses apresentando relações a/c praticamente iguais no traço rico e exatamente iguais no traço intermediário.

É possível verificar, ainda na Figura 5.14, que o CAA-TD, diferente do que se esperava visto o emprego de técnica para se obter o máximo resultado de compacidade, e o CAA-AH, apresentaram menores resultados de resistência à compressão em comparação com o CCV-R e o CAA-R. Uma suposição para essa

ocorrência decai sobre o proporcionamento entre os agregados, indicando que esse tenha sido mais adequado para CCV-R e o CAA-R.

Conforme Tabela 5.4, verifica-se que os volumes de pastas de todos os concretos pesquisados, tanto para o traço rico como para o traço intermediário, foram os mesmos.

Quanto aos resultados de R^2 , conforme Tabela 5.5, é possível avaliar que todas as equações apresentaram valores acima de 0,90, sugerindo que os dados ajustaram-se adequadamente as curvas de dosagem. Nesta tabela, também são apresentadas as equações que relacionam a relação a/c com a resistência à compressão (lei de Abrams), as equações que relacionam a relação a/c com o m (lei de Lyse) e que relacionam o consumo de cimento com o m (lei de Molinari). Apresenta ainda as equações para o cálculo do teor de argamassa seca, para todos os métodos, com exceção do CAA-AH, a equação para o cálculo do teor de substituição do CAA-AH e a equação para o cálculo do teor de SP, conforme método apresentado neste trabalho.

Tabela 5.3: Traços unitários para o CCV e os CAAs dosados experimentalmente.

Concreto	α (%)	m	Abat.*	traço unitário							H (%)	f_{c28} MPa
				cimento	areia fina	areia média	brita 0	brita 1	a/c	SP (%)***		
CCV-R	53	3	130	1	0,336	0,784	0,827	1,053	0,34	-	8,48	61,7
CCV-R	54	4,5	125	1	0,591	1,379	1,113	1,417	0,47	-	8,47	46,6
CCV-R	55	6	115	1	0,855	1,995	1,386	1,764	0,58	-	8,35	29,7
CAA-R	53	3	130	1	0,336	0,784	0,827	1,053	0,34	0,27	8,48	63,5
CAA-R	54	4,5	125	1	0,591	1,379	1,113	1,417	0,47	0,49	8,47	50,8
CAA-R	55	6	115	1	0,855	1,995	1,386	1,764	0,58	0,52	8,35	26,1
CAA-TD	58	3	105	1	0,600	0,720	0,504	1,176	0,35	0,39	8,83	58,8
CAA-TD	54	4,5	145	1	0,900	1,080	0,756	1,764	0,47	0,39	8,47	39,7
CAA-TD	52	6	120**	1	1,200	1,440	1,008	2,351	0,72	0,39	10,29	20,2
CAA-AH	59	3	130	1	0,272	1,088	0,492	1,148	0,34	0,38	8,48	57,8
CAA-AH	59	4,5	125	1	0,674	1,572	0,677	1,579	0,47	0,38	8,47	33,3
CAA-AH	59	6	105**	1	1,252	1,878	0,861	2,009	0,74	0,38	10,62	16,4

*Abatimento antes da adição do SP.

**Após adição de SP foi adicionado mais água ao concreto na tentativa de se atingir a trabalhabilidade desejada.

***Porcentagem sobre a massa de cimento.

Tabela 5.4: Consumos de materiais por m³ para o CCV e os CAAs dosados experimentalmente.

Concreto	α (%)	m	Abat.*	consumo de materiais por m ³							SP (%)****	V _{pasta} (%)*****	H (%)	f _{c28} MPa
				Cimento***	areia fina	areia média	brita 0	brita 1	água					
CCV-R	53	3	130	562	189	441	465	592	191	-	27	8,48	61,7	
CCV-R	54	4,5	125	406	240	560	452	576	189	-	23	8,47	46,6	
CCV-R	55	6	115	319	273	636	442	562	186	-	20	8,35	29,7	
CAA-R	53	3	130	562	189	441	465	592	191	0,27	27	8,48	63,5	
CAA-R	54	4,5	125	406	240	560	452	576	189	0,49	23	8,47	50,8	
CAA-R	55	6	115	319	273	636	442	562	186	0,52	20	8,35	26,1	
CAA-TD	58	3	105	556	334	400	280	654	196	0,39	27	8,83	58,8	
CAA-TD	54	4,5	145	406	365	439	307	716	189	0,39	23	8,47	39,7	
CAA-TD	52	6	120**	306	367	441	309	720	220	0,39	23	10,29	20,2	
CAA-AH	59	3	130	560	152	609	275	643	190	0,38	27	8,48	57,8	
CAA-AH	59	4,5	125	405	273	636	274	639	189	0,38	23	8,47	33,3	
CAA-AH	59	6	105**	303	379	568	261	608	225	0,38	23	10,62	16,4	

*Abatimento antes da adição do SP.

**Após adição de SP foi adicionado mais água ao concreto na tentativa de se atingir a trabalhabilidade desejada.

***consumo teórico de cimento pois o teor de ar incorporado ou aprisionado não foi avaliado para realizar correção.

****Porcentagem sobre a massa de cimento.

*****Volume da pasta considera o cimento, areia fina e média, partículas de brita 0 passante na peneira 0,15mm e a água.

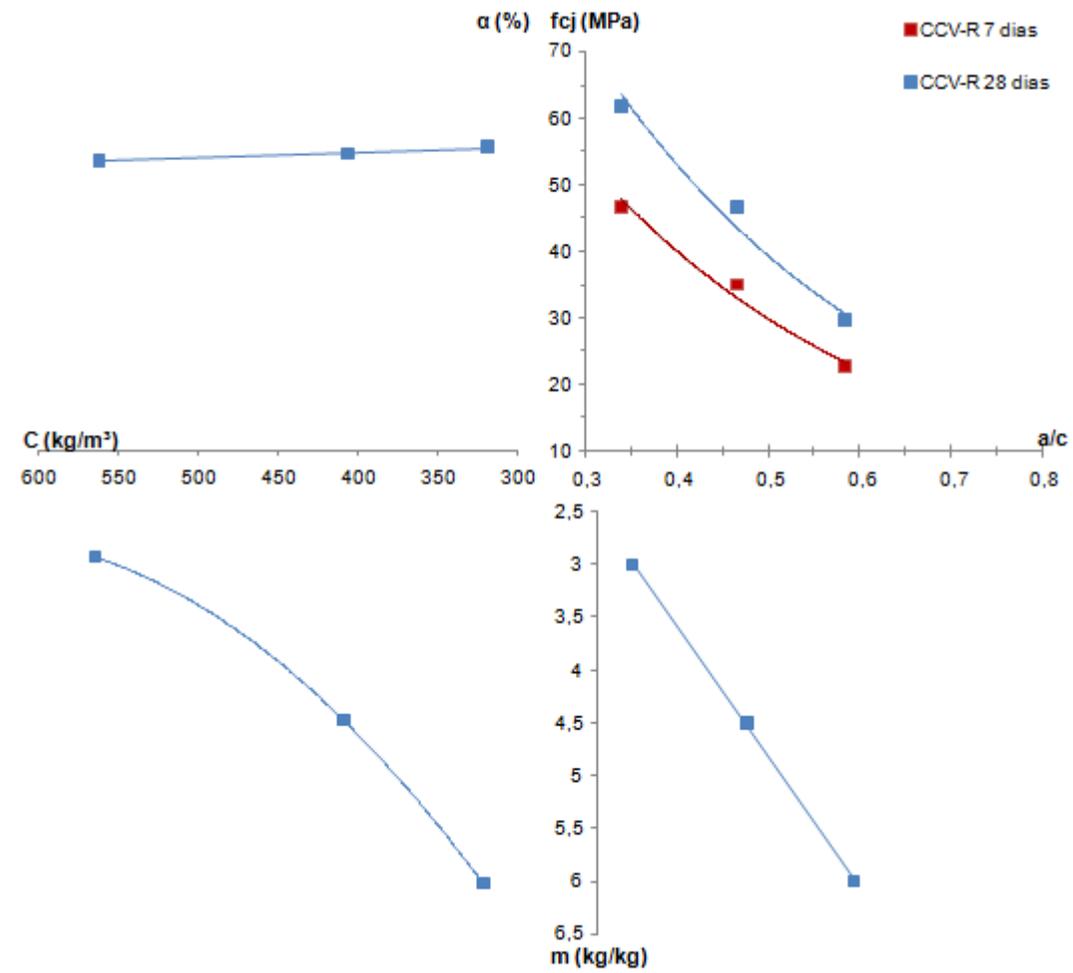


Figura 5.10: Diagrama de dosagem para o CCV-R para resistência à compressão aos 7 e 28 dias.

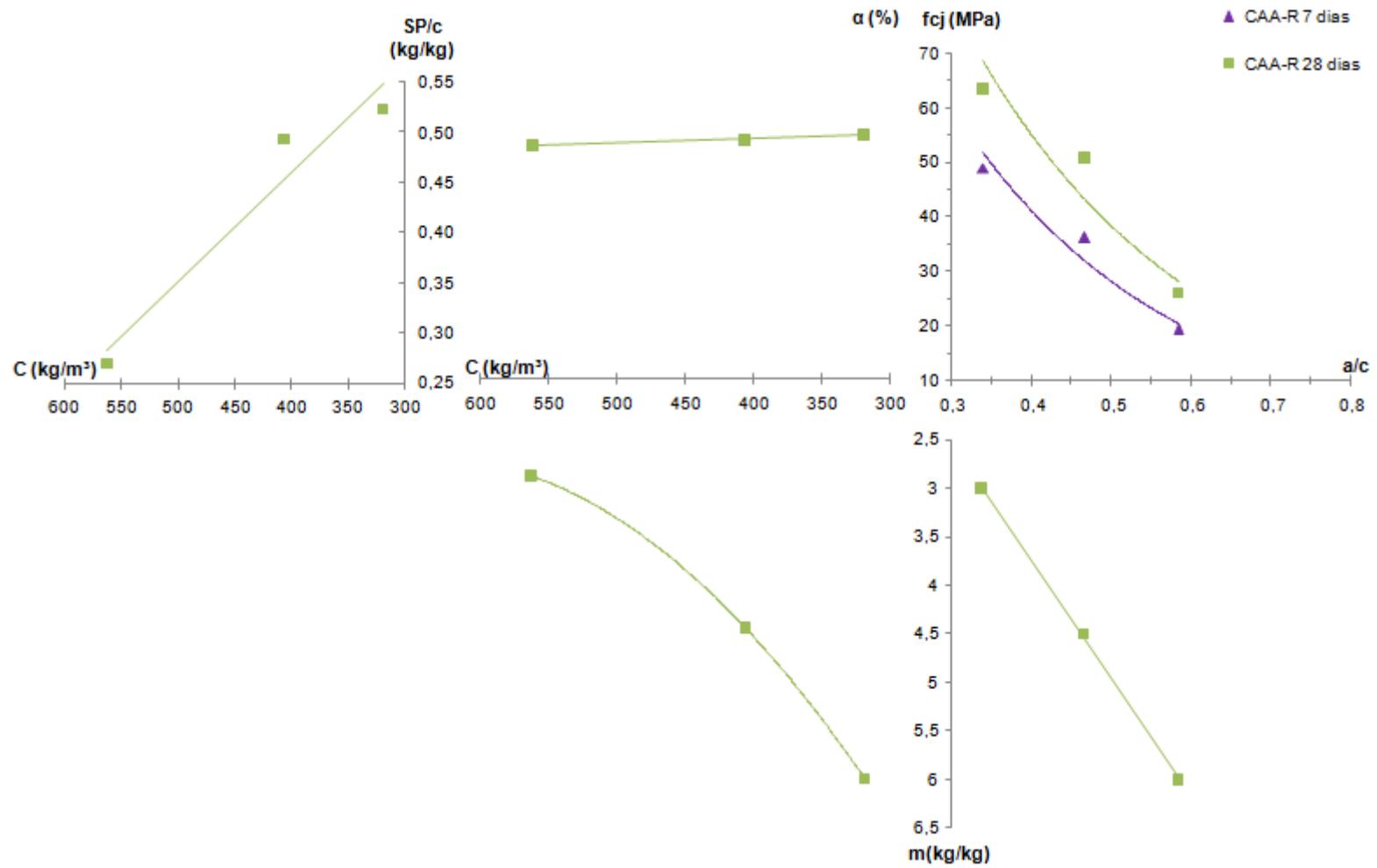


Figura 5.11: Diagrama de dosagem para o CAA-R para resistência à compressão aos 7 e 28 dias.

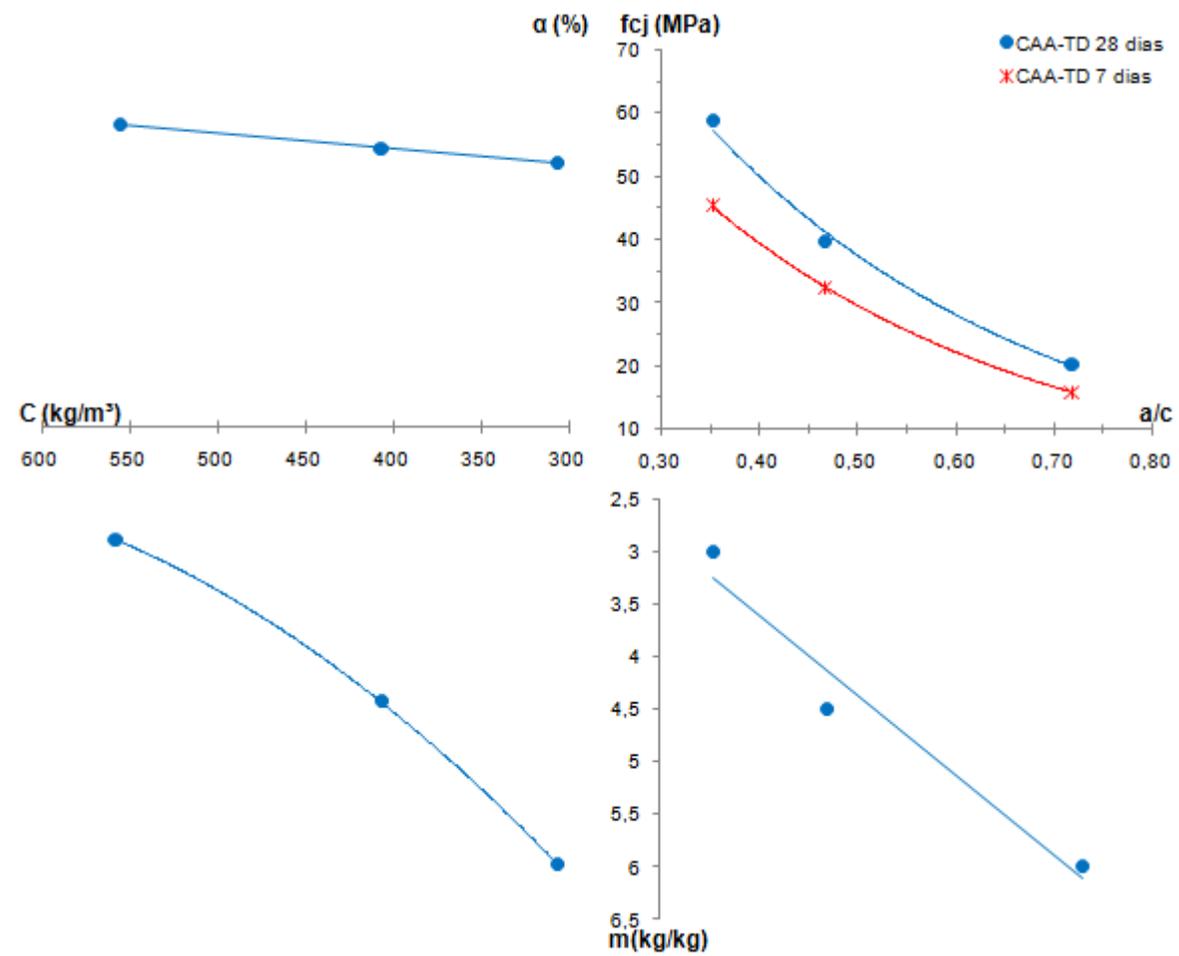


Figura 5.12: Diagrama de dosagem para o CAA-TD para resistência à compressão aos 7 e 28 dias.

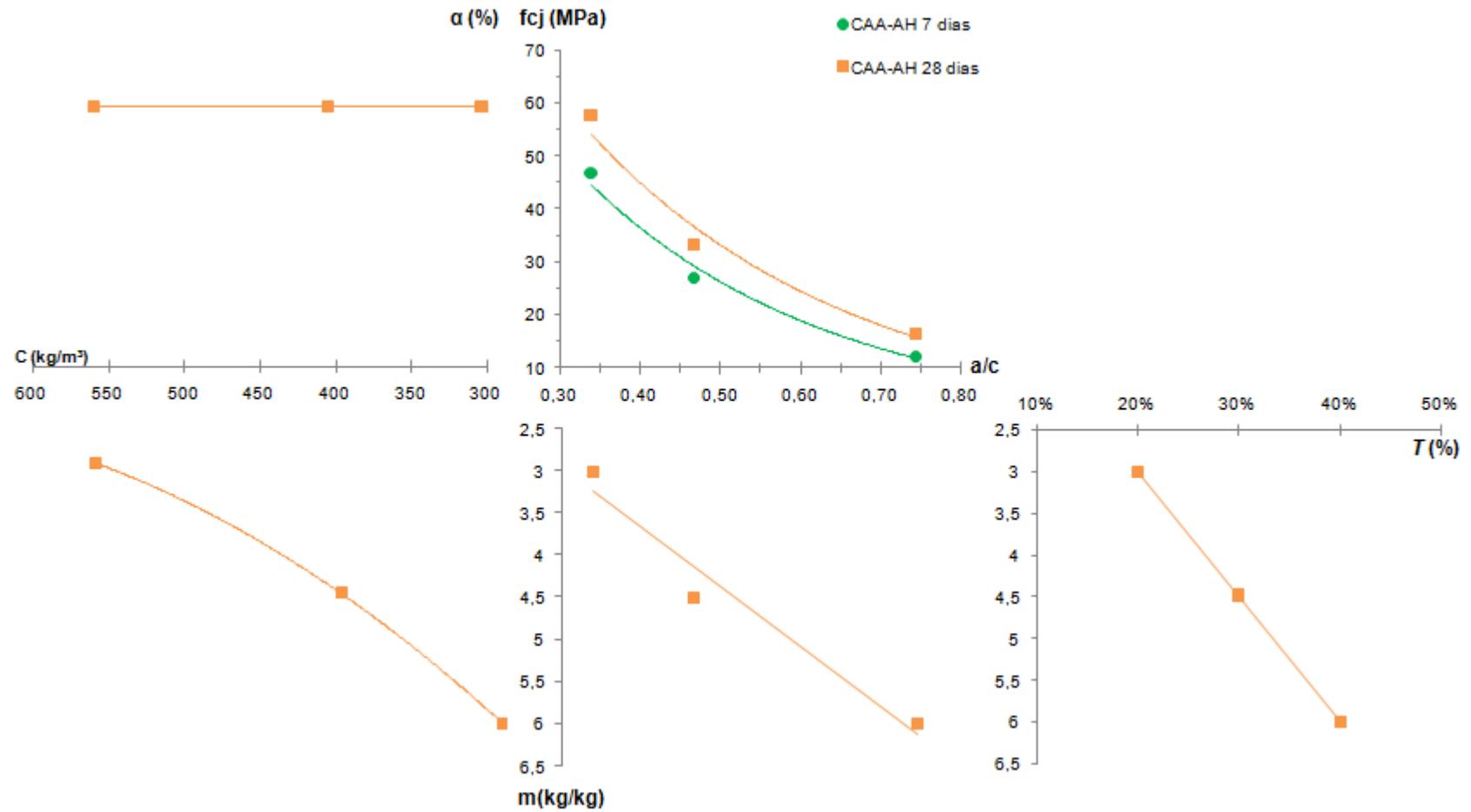


Figura 5.13: Diagrama de dosagem para o CAA-AH para resistência à compressão aos 7 e 28 dias.

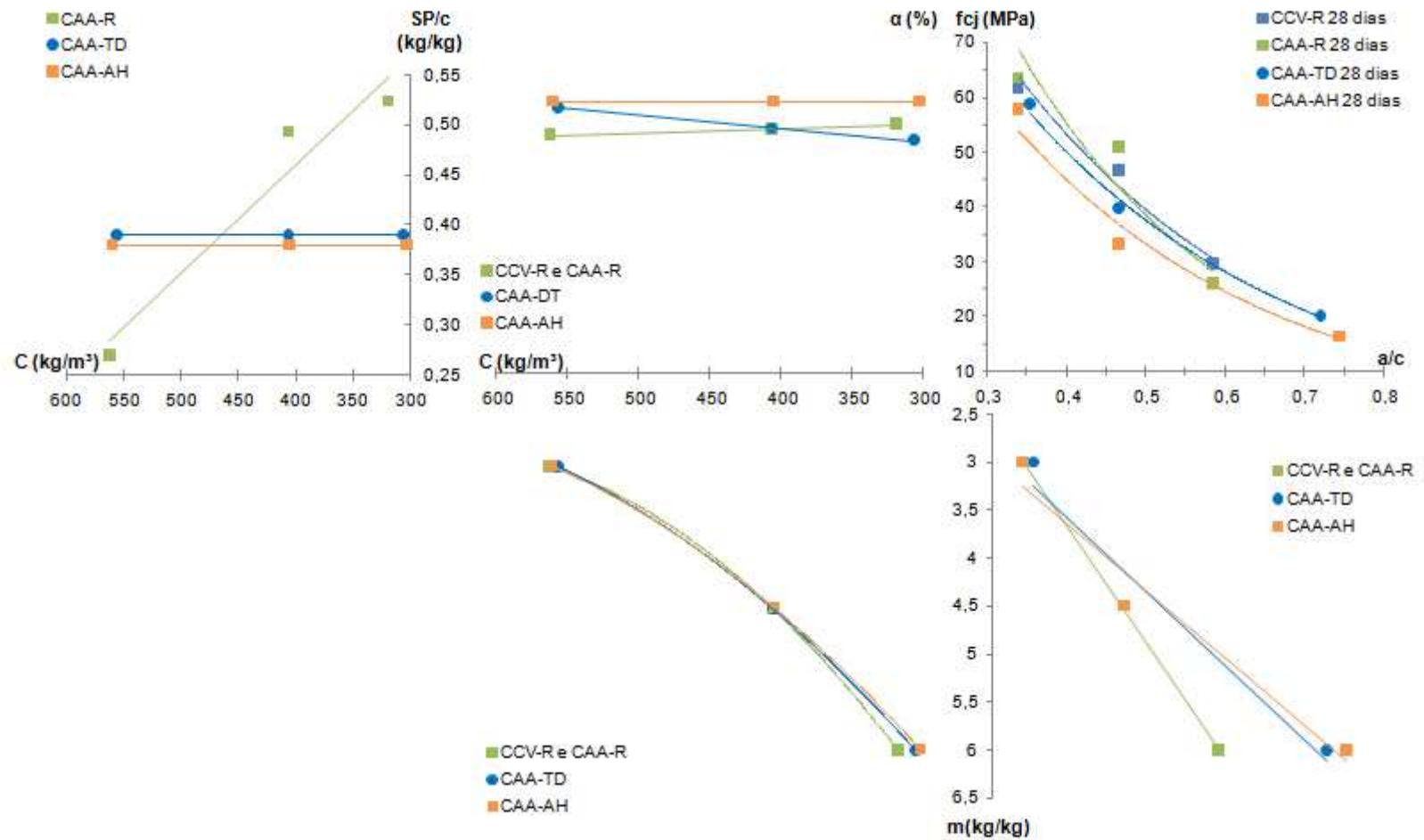


Figura 5.14: Diagrama de dosagem para o todos os concretos dosados para resistência à compressão aos 28 dias.

Tabela 5.5: Equações de comportamento e R² para o CCV e os CAAs aos 28 dias.

Concreto	Lei de Abrams	Lei de Lyse	Lei de Molinari	Determinação do teor de substituição (T)	Determinação do teor de argamassa seca (α)	Determinação da dosagem de SP/c
CCV-R	$f_{c_{28}} = \frac{174,54}{19,58^{a/c}}$	$m = -1,166 + 12,23 \times \frac{a}{c}$	$C = \frac{1000}{(0,43 + 0,45 \times m)}$		$\alpha = 57,43 - 0,008 \times C$	
	R ² = 0,98	R ² = 1	R ² = 1		R ² = 0,97	
CAA-R	$f_{c_{28}} = \frac{232,65}{36,79^{a/c}}$	$m = -1,166 + 12,23 \times \frac{a}{c}$	$C = \frac{1000}{(0,43 + 0,45 \times m)}$		$\alpha = 57,43 - 0,008 \times C$	$SP = 0,895 - 0,001 \times C$
	R ² = 0,90	R ² = 1	R ² = 1		R ² = 0,97	R ² = 0,94
CAA-TD	$f_{c_{28}} = \frac{157,4}{17,62^{a/c}}$	$m = 0,50 + 7,79 \times \frac{a}{c}$	$C = \frac{1000}{(0,31 + 0,49 \times m)}$		$\alpha = 44,52 + 0,024 \times C$	
	R ² = 0,99	R ² = 0,95	R ² = 1		R ² = 1	
CAA-AH	$f_{c_{28}} = \frac{150,29}{20,51^{a/c}}$	$m = 0,84 + 7,03 \times \frac{a}{c}$	$C = \frac{1000}{(0,24 + 0,51 \times m)}$	$m = 0,15 \times T$		
	R ² = 0,97	R ² = 0,96	R ² = 1	R ² = 1		

5.3. Propriedades no estado endurecido dos concretos dosados

A Tabela 5.6 ilustra os resultados das propriedades no estado endurecido, avaliadas neste trabalho, para os CAAs e o CCV-R.

Tabela 5.6: Tabela resumo dos concretos dosados experimentalmente com seus respectivos resultados de resistência à compressão, absorção por imersão, índice de vazios e absorção capilar.

Concreto	m	a/c	Resistência à compressão (MPa)		Absorção de água por Imersão (%)	Índice de Vazios (%)*	Absorção de água por Capilaridade (g/cm ²)
			7 dias	28 dias			
CCV-R	3	0,34	46,6	61,7	6,02%	13,49%	0,994
			45,9	61,1	5,77%	13,02%	1,006
CCV-R	4,5	0,47	34,9	46,0	5,85%	13,08%	1,057
			34,6	46,6	5,83%	13,02%	1,006
CCV-R	6	0,58	22,6	27,3	7,01%	15,31%	1,662
			22,7	29,7	6,84%	15,09%	1,350
CAA-R	3	0,34	47,8	62,7	6,19%	13,79%	0,930
			49,0	63,5	5,82%	12,98%	0,981
CAA-R	4,5	0,47	32,9	47,6	5,88%	13,18%	0,892
			36,2	50,8	5,88%	13,18%	0,994
CAA-R	6	0,58	19,3	26,1	6,66%	14,54%	1,503
			19,4	25,4	6,92%	14,91%	1,401
CAA-TD	3	0,35	45,5	57,0	7,05%	15,85%	0,860
			44,2	58,8	7,21%	15,62%	0,815
CAA-TD	4,5	0,47	31,7	39,1	6,82%	14,96%	1,115
			32,3	39,7	7,11%	15,58%	1,006
CAA-TD	6	0,72	15,7	20,2	7,92%	17,08%	1,076
			15,0	19,4	8,07%	17,35%	1,166
CAA-AH	3	0,34	45,9	57,8	6,61%	14,83%	0,892
			46,7	55,1	6,54%	14,76%	0,917
CAA-AH	4,5	0,47	27,1	33,3	7,11%	15,18%	0,930
			26,5	31,5	6,96%	14,91%	0,962
CAA-AH	6	0,74	11,9	16,0	10,04%	20,32%	1,057
			12,0	16,4	9,95%	20,83%	1,159

*relação entre o volume de poros permeáveis e o volume total da amostra.

Conforme a mesma tabela, nota-se que, de maneira geral, os resultados de absorção de água por imersão, índice de vazios e de absorção de água por capilaridade foram influenciados pela relação a/c, conforme verificado por Helene e

Terzian (1992). O único concreto que não seguiu essa influência foi o CAA-TD que apresentou resultados de absorção por imersão e índice de vazios menores no traço rico (1:3) em comparação com o traço intermediário (1:4,5).

Comparando os resultados de durabilidade do CCV-R e do CAA-R, ambos com mesma relação a/c e proporcionamento de materiais para o mesmo traço-base, verifica-se que o CAA apresentou menores resultados de absorção por imersão e capilaridade, possivelmente em razão da ação do SP que melhorou a distribuição dos produtos de hidratação do cimento e conseqüentemente o refinamento dos poros.

Conforme apresentado no item 3.7.2.1., na avaliação da CEB-192 (apud Giannotti, 2006, p.113), os concretos dosados neste trabalho são classificados como de alta absorção e qualidade pobre. Considerando a avaliação de Helene (apud Giannotti, 2006, p.113), os concretos CAA-R e CCV-R com traços ricos e intermediários são classificados como normais, e os demais concretos deste trabalho são classificados como deficientes.

A Tabela 5.7 apresenta os resultados de absorção de água por imersão para CAAs e concretos convencionais de diferentes autores, conforme relatado no item 3.7.2.1. Comparando os resultados de absorção dos concretos dosados neste trabalho com essas referências, e utilizando como parâmetros de comparação a relação a/agl e/ou a resistência à compressão, nota-se que, os resultados de absorção por imersão variam entre 5,77% e 9,95%, e foram em média superiores aos valores das referências listadas na Tabela 5.7. O único resultado próximo foi o de Borralleras et al. (2007) que determinou como 6,7% a absorção por imersão de um CAA de 76 MPa.

Tabela 5.7: Tabela comparativa de resultados de absorção por imersão para diferentes concretos.

Tipo concreto	Referência	Absorção de água por imersão (%)**	Relação a/agl***	Resistência à compressão aos 28 dias (MPa)***
CAA	Hammed (2005)	3,72	0,42	-
CAA	Dinakar et al. (2008)	8,84 – 4,33	-	14,6 – 71,6
CCV*	Gonçalves (2000)	4,53 – 5,53	0,40	-
CAA	Borralleras et al. (2007)	6,7	0,40	76
CAA	Schutter e Audenaert (2004)	3,40 – 6,10	0,37 – 0,55	-

*concreto convencional.

**ensaio realizado entre 28 e 35 dias após moldagem de CP; os procedimentos de ensaio podem ser diferentes conforme norma utilizada.

***valores médios ou faixas de valores.

Todos os resultados de absorção por capilaridade dos concretos dosados neste trabalho foram bem maiores do que os encontrados na literatura, conforme item 3.7.2.2., sugerindo uma formação de poros capilares deficiente.

Muitos dos CAAs listados na revisão bibliográfica e utilizados na comparação com os concretos dosados neste trabalho, utilizaram finos na sua formulação, isto pode ter favorecido o refinamento dos poros capilares e permeáveis. A ação dos finos em conjunto com o SP pode ter causado uma melhor dispersão dessas partículas na mistura e um melhor fechamento dos poros.

5.3.1. Relação entre absorção de água por imersão, absorção de água por capilaridade e relação a/c

A Figura 5.15 relaciona os resultados da absorção de água por imersão com a relação a/c de todos os concretos dosados neste trabalho. Verifica-se que o coeficiente de correlação R^2 resulta baixo, apesar de, como dito anteriormente, existir influência da relação a/c sobre a absorção de água por imersão. A partir do gráfico é possível dizer que existe uma tendência de que com o aumento da relação a/c ocorre um aumento absorção de água por imersão.

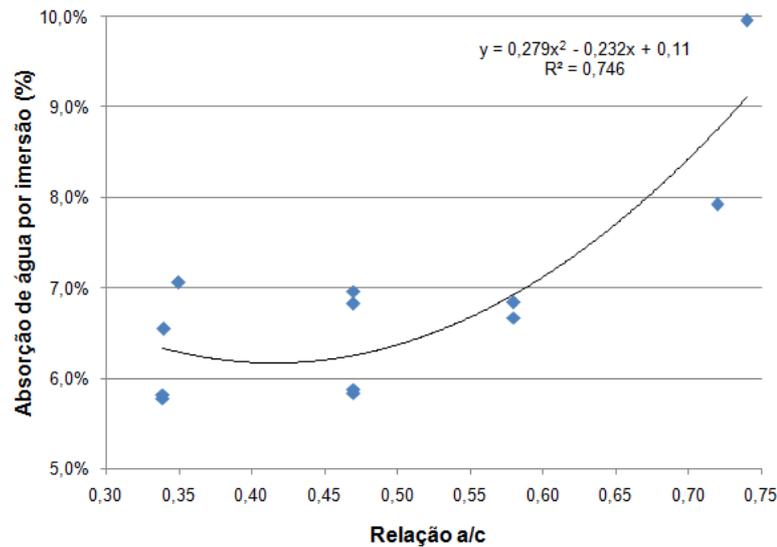


Figura 5.15: Gráfico que relaciona absorção por imersão e a relação a/c.

Massazza et al. (apud Gonçalves 2000, p.95) afirma que os resultados do ensaio de absorção capilar podem ser relacionados com a relação a/c de pastas e argamassas de cimento Portland.

Tentou-se relacionar os resultados de absorção de água por capilaridade e a relação a/c de todos os concretos dosados neste trabalho, contudo, verificou-se que não houve correlação entre as variáveis, apenas uma tendência de que com o aumento da relação a/c ocorre um aumento da absorção de água por capilaridade.

5.3.2. Relação entre resistência à compressão e índice de vazios

Decidiu-se investigar, a partir dos ensaios realizados, as diferenças dos resultados de resistência à compressão dos concretos dosados, principalmente no traço intermediário (1:4,5), que apresentou as maiores diferenças entre os concretos. Conforme Figura 5.16, que grafica o índice de vazios, calculado conforme a ABNT NBR 9778, 2005, e a resistência à compressão do concreto aos 28 dias, verifica-se que a correlação entre essas duas variáveis é baixa, R^2 igual a 0,60, quando se avalia todos os concretos em conjunto (linha de tendência preta e equação sem cor de fundo).

Na mesma figura, analisando individualmente cada concreto, identificados através das diferentes cores, que o CAA-R, CCV-R e CAA-AH apresentaram as correlações R^2 acima de 0,83, portanto com ajustes adequados. O CAA-TD apresentou a correlação mais pobre, com o R^2 igual a 0,48, em razão de um maior índice de vazios do traço rico (1:3) em comparação com o intermediário (1:4,5).

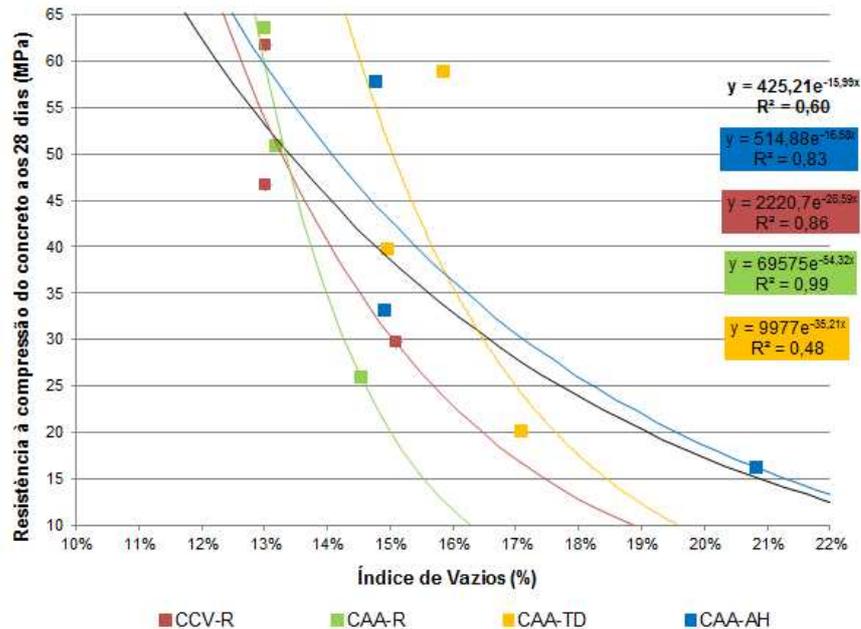


Figura 5.16: Gráfico que relaciona índice de vazios e resistência à compressão aos 28 dias.

Partiu-se, então, para a avaliação do CAA-TD, utilizando-se outros dois traços dosados pelo método de Tutikian e Dal Molin (2007), um rico e um intermediário com suas características no estado fresco e endurecido apresentados na Tabela 5.8 e 5.9, utilizados na fase de teste, conforme comentado no item 4.1 página 112, e que tiveram a avaliação de resistência à compressão aos 7 dias e índices de vazios medidos aos 28 dias. Assim, conforme a Figura 5.17, foram plotados novamente os índices de vazios, medidos aos 28 dias, e os resultados de resistência à compressão aos 7 dias de todos os traços originais e dos 2 novos pontos referentes aos testes realizados no início do trabalho. Esses dois pontos são identificados no gráfico como CAA-TD Extras. Neste mesmo gráfico observar-se que o ponto de maior resistência do CAA-TD novamente apresentou maior índice de vazios sugerindo que o proporcionamento dos agregados neste traço possa não ser o mais adequado.

Tabela 5.8: Resultados de trabalhabilidade para o CAA-TD Extras.

Concreto	α (%)	m	Abat.*	SP %***	Espalhamento (mm)	t_{500} (s)	Caixa L**** (H2/H1)	Funil V (s)	Coluna de Segregação (%)
CAA-TD Extras	58	3	105	0,37	670	1,4	0,90	3,4	7
CAA-TD Extras	54	4,5	125	0,37	680	1,5	0,80	3,8	9

*abatimento medido antes da adição do SP.

**após a adição do SP foi adicionado mais água para atender a trabalhabilidade desejada.

***porcentagem sobre a massa de cimento.

****ensaio realizado com 3 barras.

Tabela 5.9: Traços unitários para o CAA-TD Extras.

Concreto	α (%)	m	cimento	areia fina	areia média	brita 0	brita 1	a/c	H (%)	f_{c7} MPa
CAA-TD Extras	58	3	1	0,600	0,720	0,504	1,176	0,38	9,59	39,9
CAA-TD Extras	54	4,5	1	0,900	1,080	0,756	1,764	0,47	8,47	28,9

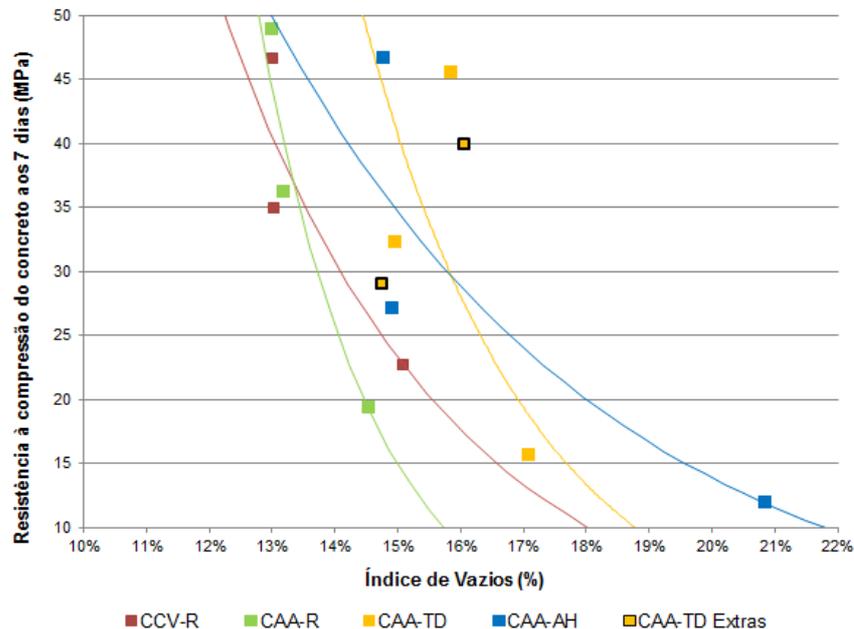


Figura 5.17: Gráfico que relaciona índice de vazios e resistência à compressão aos 7 dias.

Os vazios mensurados no ensaio de absorção por imersão são os vazios permeáveis do CP. Esses resultados podem fornecer uma indicação do comportamento do total de vazios do concreto. Assim, é possível sugerir que um maior índice de vazios dos CPs tenha influenciado nos resultados de resistência à

compressão das misturas. Ainda que, conforme Figura 5.17, a relação entre estas duas variáveis, não tenha demonstrado forte correlação.

5.4. Custo unitário do concreto

Para análise comparativa de custo unitário entre os CAAs e o CCV-R foram selecionados os traços de resistência característica à compressão (f_{ck}) de 30MPa, 40MPa e 50MPa. O cálculo de resistência de dosagem (f_{cj}) foi obtida, conforme definido por Recena (2011), através a Equação 5.2:

$$f_{cj} = f_{ck} + 1,65 \times S_d \quad (5.1)$$

Onde:

f_{cj} : resistência de dosagem a “j” dias de dosagem;

f_{ck} : resistência característica à compressão;

S_d : desvio padrão, considerado neste trabalho como igual a 3MPa²⁴.

As Tabelas 5.10, 5.11 e 5.12 apresentam respectivamente os traços unitários, o consumo de materiais por m³ e o custo de materiais por m³. Os valores dos materiais utilizados foram disponibilizados no APÊNDICE.

²⁴Situação hipotética de condições rigorosas de controle de qualidade.

Tabela 5.10: Traços unitários do CCV e dos CAAs selecionados conforme resistência de dosagem calculada.

Concreto	f _{ck28} MPa	f _{c28} MPa	α (%)	m	traço unitário							H (%)
					cimento	areia fina	areia média	brita 0	brita 1	a/c	SP (%)*	
CCV-R	30	35	55	5,44	1	0,756	1,763	1,285	1,635	0,54	-	8,39
CCV-R	40	45	54	4,34	1	0,566	1,320	1,079	1,373	0,45	-	8,43
CCV-R	50	55	53	3,48	1	0,418	0,976	0,918	1,169	0,38	-	8,48
CAA-R	30	35	55	5,19	1	0,713	1,665	1,239	1,577	0,52	0,53	8,40
CAA-R	40	45	54	4,34	1	0,566	1,320	1,079	1,373	0,45	0,48	8,42
CAA-R	50	55	54	3,73	1	0,460	1,074	0,964	1,227	0,40	0,42	8,46
CAA-TD	30	35	54	4,55	1	0,898	1,098	0,767	1,789	0,52	0,39	9,37
CAA-TD	40	45	55	3,85	1	0,760	0,929	0,648	1,512	0,43	0,39	8,87
CAA-TD	50	55	57	3,30	1	0,653	0,798	0,556	1,297	0,36	0,39	8,37
CAA-AH	30	35	59	4,24	1	0,418	1,673	0,644	1,503	0,48	0,38	9,16
CAA-AH	40	45	59	3,67	1	0,527	1,230	0,575	1,341	0,40	0,38	8,56
CAA-AH	50	55	59	3,18	1	0,586	0,878	0,514	1,199	0,33	0,38	7,89

*Porcentagem sobre a massa de cimento.

Tabela 5.11: Consumo de materiais em kg/m³ do CCV e dos CAAs selecionados conforme resistência de dosagem calculada.

Concreto	f _{ck28} MPa	f _{c28} MPa	α (%)	m	consumo de materiais em kg/m ³								H (%)
					cimento	areia fina	areia média	brita 0	brita 1	água	Plastificante	SP	
CCV-R	30	35	55	5,44	348	263	613	447	568	188	2,1	0,0	8,39
CCV-R	40	45	54	4,34	420	238	554	453	576	189	2,5	0,0	8,43
CCV-R	50	55	53	3,48	501	209	489	460	585	190	3,0	0,0	8,48
CAA-R	30	35	55	5,19	361	258	602	448	570	188	2,2	1,9	8,40
CAA-R	40	45	54	4,34	420	238	554	453	576	189	2,5	2,0	8,42
CAA-R	50	55	54	3,73	475	219	510	458	582	190	2,8	2,0	8,46
CAA-TD	30	35	54	4,55	394	354	432	302	704	205	2,4	1,5	9,37
CAA-TD	40	45	55	3,85	455	346	423	295	689	196	2,7	1,8	8,87
CAA-TD	50	55	57	3,30	518	339	414	288	672	187	3,1	2,0	8,37
CAA-AH	30	35	59	4,24	416	174	696	268	626	200	2,5	1,6	9,16
CAA-AH	40	45	59	3,67	473	249	582	272	635	189	2,8	1,8	8,56
CAA-AH	50	55	59	3,18	538	315	472	276	644	177	3,2	2,0	7,89

Tabela 5.12: Custo dos materiais por m³ (R\$) dos traços selecionados do CCV e dos CAAs para comparação de custo.

Concreto	f _{ck28} MPa	f _{c28} MPa	α (%)	m	custo dos materiais por m ³ em R\$								Total (R\$)
					cimento	areia fina	areia média	brita 0	brita 1	água	P	SP	
CCV-R	30	35	55	5,44	118	9	18	9	12	5	6,5	0,0	176
CCV-R	40	45	54	4,34	143	8	16	9	12	5	7,8	0,0	200
CCV-R	50	55	53	3,48	170	7	14	9	12	5	9,3	0,0	226
CAA-R	30	35	55	5,19	123	8	17	9	12	5	6,7	22,1	203
CAA-R	40	45	54	4,34	143	8	16	9	12	5	7,8	22,8	223
CAA-R	50	55	54	3,73	161	7	15	9	12	5	8,8	22,8	241
CAA-TD	30	35	54	4,55	134	11	13	6	15	5	7,3	17,6	208
CAA-TD	40	45	55	3,85	155	11	12	6	14	5	8,5	20,3	232
CAA-TD	50	55	57	3,30	176	11	12	6	14	5	9,7	23,2	256
CAA-AH	30	35	59	4,24	142	6	20	5	13	5	7,8	18,1	217
CAA-AH	40	45	59	3,67	161	8	17	5	13	5	8,8	20,6	238
CAA-AH	50	55	59	3,18	183	10	14	5	13	4	10,0	23,4	263

A Figura 5.18 registra os custos dos materiais por m³ para os concretos dosados neste trabalho, considerando as resistências características de 30MPa, 40MPa e 50MPa. O CCV-R é o concreto de menor custo, pois apresentou a curva de Abrams bastante próxima ao CAA-R, mas com a vantagem de não ter utilizado a adição do SP. O concreto de maior custo foi o CAA-AH influenciado, principalmente, pelos menores resultados de resistência à compressão, seguido do CAA-TD também influenciado pelos menores resultados à compressão, quando comparado ao CAA-R. Esse último concreto foi, entre os CAAs, o concreto que apresentou menor custo por m³. É possível dizer que seu menor custo unitário foi função da maior resistência à compressão para um determinado consumo de cimento. Portanto, os concretos que obtiveram as maiores resistências para uma mesmo consumo de cimento, resultaram nos concretos mais baratos. A diferença de custo por m³ entre o método de dosagem de CAA de menor valor para o de maior valor manteve-se entre 7% e 9% para todas as três resistências analisadas.

Ainda quanto ao custo de materiais por m³ de concreto, nota-se que, entre o CCV-R e o CAA-R, houve um aumento de 15%, 12% e 7%, respectivamente para as faixas de 30MPa, 40MPa e 50MPa. Essa diferença de valores é consoante ou inferior aos custos encontrados na literatura. Contudo, ressalta-se que a utilização de areia fina no CCV-R pode ter influenciado no custo.

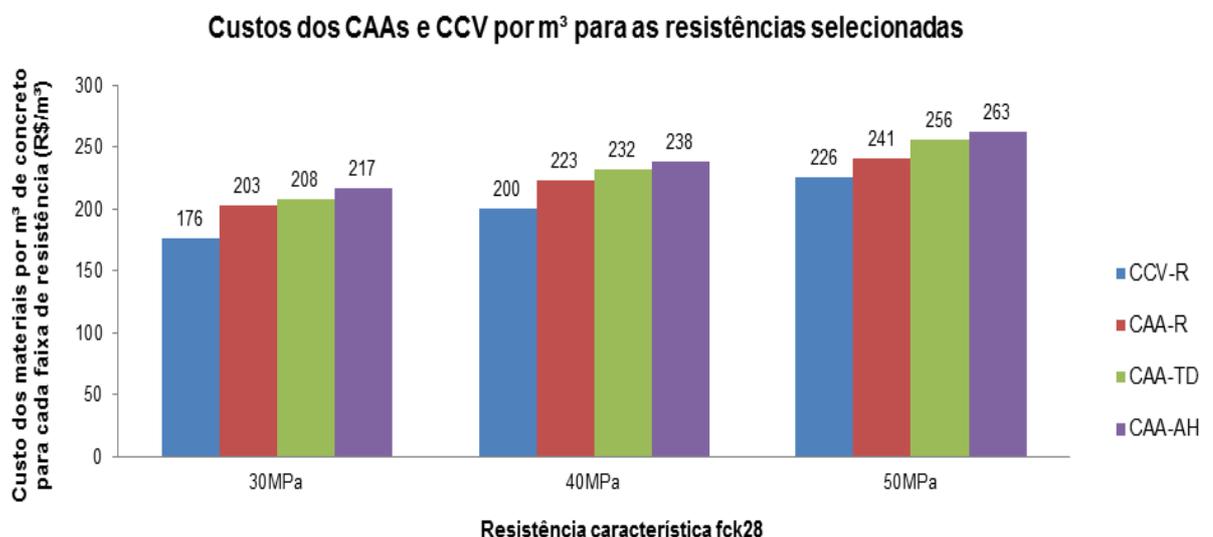


Figura 5.18: Custo dos materiais por m³ para produção dos CAAs e CCV-R, conforme resistências características selecionadas.

6. CONCLUSÕES

Pode-se observar a divisão dos métodos nacionais de dosagem em dois grupos e alguns comportamentos e aspectos importantes apresentados por esses métodos, durante o processo de dosagem do CAA.

Foi possível obter um CAA atendendo aos pré-requisitos estipulados e a partir do procedimento de dosagem de um concreto convencional. Os resultados no estado fresco e endurecido do CAA, dos traços rico e intermediário deste trabalho, mostraram-se iguais ou superiores aos concretos dosados pelos demais métodos. Contudo, observou-se que, nos traços pobres, o comportamento não foi adequado no que se refere ao controle da segregação em virtude da menor coesão da mistura, ocasionado pela pouca quantidade de cimento e, possivelmente, de areia fina.

Foi constatado que, dentre os ensaios de trabalhabilidade empregados e considerando as faixas de aceitação estipuladas, a caixa L foi o que apresentou a maior dificuldade de ser atendida pelos concretos dosados. As necessidades de ajustes nas misturas, quando ocorreram, foram na sua totalidade decorrentes dos baixos resultados desse ensaio.

Quanto à diferença encontrada entre os resultados de resistência à compressão, especificamente no traço intermediário ($m = 4,5$) com relação a/c de 0,47, é possível supor, considerando os valores dos índices de vazios e uma associação direta desse fator com a porosidade total do concreto, ter havido influência dos vazios na redução da resistência do CAA-TD e CAA-AH. O aumento da porosidade das amostras pode estar relacionado com o proporcionamento dos materiais.

Com relação à dosagem do SP variável, verifica-se que essa aplicação possibilitou maior flexibilidade no controle da trabalhabilidade, e no caso de traços pobres, reduziu a quantidade de água adicionada, reduzindo a relação a/c e aumentando a resistência à compressão. Mesmo que os concretos dosados tenham tido comportamentos da curva de Abrams distintos, a necessidade de uma maior dosagem de SP/c no traço pobre foi identificada. As vantagens financeiras de se utilizar à dosagem do SP variável e assim poder reduzir a relação a/c são menores a medida que a resistência característica reduz, em função do aumento do consumo do SP, mesmo assim foi possível verificar o ganho financeiro.

Quanto ao custo de materiais por m³ de concreto, verificou-se que o incremento do valor do CCV-R para o CAA-R (CAA de menor custo) variou de 15%, para a resistência característica de 30MPa, até 8% para a resistência característica de 50MPa. Esses incrementos de custos com materiais são consoantes ou inferiores ao encontrado na literatura.

É possível obter CAAs com qualquer um dos métodos apresentados, devendo ser priorizado aquele procedimento de maior simplicidade e facilidade de aplicação. É importante frisar que o estudo desenvolvido apresenta uma visão pontual uma vez, que os resultados dos ensaios foram obtidos sobre uma única reprodução dos concretos experimentais.

A comparação direta dos resultados deve representar apenas uma informação que deverá ser entendida a partir da análise do trabalho em todas as suas etapas.

7. PROPOSTAS PARA TRABALHOS FUTUROS

Realizar estudos comparativos mais amplos, abrangendo os métodos nacionais de dosagem de CAA de Gomes et al (2002), Repette e Melo (2005) e novos métodos que possam ser desenvolvidos, analisando vantagens e desvantagens de cada opção e respondendo perguntas que não puderam ser respondidas neste trabalho.

Estudar o efeito do SP sobre toda a mistura do concreto, em traços ricos, intermediários e pobres, esclarecendo a ação desse aditivo no concreto.

É necessário aprofundamento sobre as questões de proporcionamento dos materiais no CAA: o efeito da distribuição granulométrica e da redução do índice de vazios dos agregados, em conjunto com a pasta, sobre a trabalhabilidade e os resultados dos ensaios de resistência à compressão e durabilidade.

Esclarecida a questão anterior sugere-se o desenvolvimento de procedimentos laboratoriais que possibilitem a obtenção de composições granulométricas de agregados “ideais” ou “ótimas” no que tange à trabalhabilidade, resistência e durabilidade.

8. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALENCAR, R. S. A.; Helene, P. Concreto autoadensável de elevada resistência – inovação tecnológica na indústria de pré-fabricados. **Revista Concreto e Construções, Ed. IBRACON**, São Paulo, n. 43, p. 43-52, 2006. Disponível em: <http://www.ibracon.org.br/publicacoes/revistas_ibracon/rev_construcao/revistas.asp>. Acesso em: 22 agosto 2010.

ALENCAR, R. S. A.; Helene, P.; Honda, J. Trabalhabilidade do concreto autoadensável: ensaios para dosagem, controle de qualidade e aceitação em obra. **Revista concreto e construções, Ed. IBRACON**, São Paulo, n. 51, p. 76-85, 2008. Disponível em: <http://www.ibracon.org.br/publicacoes/revistas_ibracon/rev_construcao/revistas.asp>. Acesso em: 22 agosto 2010.

ALENCAR, Ricardo dos Santos Arnaldo de. **Dosagem de concreto autoadensável: produção de pré-fabricados**. São Paulo. 2008. 176p. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Construção Civil e Urbana). Departamento de engenharia de construção civil, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, Brasil. Disponível em: <<http://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/3/3146/tde-19092008-161938/>>. Acesso em: 27 maio 2009.

ALMEIDA, R. Concretos de alto desempenho In: ISAIA, G. C., Editor. In: **Concreto: ensino, pesquisa e realizações**. São Paulo, 2005, v. 2, p. 1159-1193.

ALVES, R. A. R.; Helene, P. R. L. Contribuição ao estudo dos aditivos superfluidificantes utilizados em concreto fluido. São Paulo: EPUSP, 1994. 27p. (Boletim Técnico, BT/PCC 135).

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 7217. Agregados - Determinação da composição granulométrica. Rio de Janeiro: ABNT, 2003, 3p.

_____. NBR 15823-1. Concreto autoadensável Parte 1: Classificação, controle e aceitação no estado fresco. Rio de Janeiro: ABNT, 2010, 11p.

_____. NBR 15823-2. Concreto autoadensável Parte 2: Determinação do espalhamento e do tempo de escoamento - Método do cone de Abrams. Rio de Janeiro: ABNT, 2010, 4p.

_____. NBR 15823-4. Concreto autoadensável Parte 4: Determinação da habilidade passante - Método da caixa L. Rio de Janeiro: ABNT, 2010, 4p.

_____. NBR 15823-5. Concreto autoadensável Parte 5: Determinação da viscosidade - Método da funil V. Rio de Janeiro: ABNT, 2010, 3p.

_____. NBR 15823-6. Concreto autoadensável Parte 6: Determinação da resistência à segregação – Método da coluna de segregação. Rio de Janeiro: ABNT, 2010, 3p.

_____. NBR 5739. Concreto – Ensaio de compressão de corpos-de-prova cilíndricos. Rio de Janeiro: ABNT, 2007, 9p.

_____. NBR 9778. Argamassa e concreto endurecidos – Determinação da absorção de água, índice de vazios e massa específica. Rio de Janeiro: ABNT, 2005, 4p.

_____. NBR NM 45. Agregados – Determinação da massa unitária e volume de vazios. Rio de Janeiro: ABNT, 2006, 8p.

_____. NBR NM 52. Agregado miúdo – Determinação da massa específica e massa específica aparente. Rio de Janeiro: ABNT, 2009, 6p.

_____. NBR NM 53. Agregado graúdo – Determinação da massa específica,

massa específica aparente e absorção de água. Rio de Janeiro: ABNT, 2009, 8p.

_____. NBR NM 67. Concreto - Determinação da consistência pelo abatimento do tronco de cone. Rio de Janeiro: ABNT, 1998, 3p.

BETHMONT, S.; D'aloia Schwartzentruber, L.; Stefani, C.; Tailhan, J. L.; Rossi, P. Contribution of granular interactions to self compacting concrete stability: development of a new device. **Cement and Concrete Research**. v. 39, p. 30-35, 2009.

BOGGIO, Aldo J. **Estudo comparativo de métodos de dosagem de concretos de cimento Portland**. Porto Alegre. 2000. 180p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil). Escola de Engenharia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Brasil. Disponível em: <<http://www.lume.ufrgs.br>>. Acesso em: 27 outubro 2010.

BORRALLERAS, P.; Barragán, B.; Gettu, R. Comparison of durability parameters between conventional concrete, standard SCC and steel fibre reinforced SCC for construction of thin elements Part. 1: Durability tests. In: **5th International RILEM Symposium on Self-Compacting Concrete: 2007**, Ghent. Symposium. p. 1079-1091. Disponível em: <<http://www.rilem.net>>. Acesso em: 27 maio 2011.

CALLISTER JUNIOR, William D. **Ciência e engenharia de materiais: uma introdução**. Rio de Janeiro: LTC, 2002. 589p.

CASTRO, Alessandra Lorenzenti de. **Aplicação de conceitos reológicos na tecnologia de concretos de alto desempenho**. São Carlos. 2007. 302p. Tese (Doutorado em Ciência e Engenharia de Materiais). Escola de Engenharia de São Carlos\Instituto de Física de São Carlos\Instituto de Química de São Carlos, Universidade de São Carlos, Brasil. Disponível em: <<http://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/88/88131/tde-04032008-082549/pt-br.php>>. Acesso em: 5 maio 2011.

COLLEPARDI, Mario. A very close precursor of self-compacting concrete (SCC). In:

Supplementary volume of the Proceedings of Three-day CANMET/ACI International Symposium of Sustainable Development of Concrete Technology: 2001, S. Francisco. p. 16-19. Disponível em: <<http://www.encosrl.it/enco%20srl%20ENG/servizi/pubblicazioni/cls.html>>. Acesso em: 30 agosto 2010.

COLLEPARDI, Mario. Chemical admixtures today. In: **Proceedings of Second International Symposium on Concrete Technology for Sustainable - Infrastructure Development with Emphasis on Infrastructure:** 2005, Hyderabad, p. 527-541. Disponível em: <<http://www.encosrl.it/enco%20srl%20ENG/servizi/pubblicazioni/cls.html>>. Acesso em: 30 agosto 2010.

COLLEPARDI, Mario. Mechanical properties of self-compacting and flowing concretes. In: **Terence C. Holland Symposium on Advances in Concrete Technology:** 2007, Warsaw. p. 379-384. Disponível em: <<http://www.encosrl.it/enco%20srl%20ENG/servizi/pubblicazioni/cls.html>>. Acesso em: 30 agosto 2010.

DE LARRARD, F.; Ferraris C. F.; Sedran T. Fresh concrete: a Herschel-Bulkley material. **Materials and Structures**, v.31, p. 494-498, 1998.

DE LARRARD, François. **Structures granulaires et formulation des bétons.** Études et Recherches des Laboratoires des Ponts et Chaussées. Ouvrages d'art OA 34, 1999. 414p. Disponível em: <<http://www.lcpc.fr/fr/produits/betonlabpro/docu.php>>. Acesso em: 22 agosto 2010.

DE SCHUTTER, G.; Audenaert, K. Evaluation of water absorption of concrete as a measure for resistance against carbonation and chloride migration. **Materials and Structures**, v.37, p.591-596, 2004.

DÍAZ, Vitervo O'Reilly. **Método de dosagem de concreto de elevado desempenho.** São Paulo: PINI, 1998. 122p.

DILEK, U.; Leming, M. L. Relationship between particle shape and void content of fine aggregate. **Cement, Concrete and Aggregates**. v. 26, n. 1, p. 1-7, 2004.

DINAKAR P., Babu K. G., Santhanam, M. Durability properties of high volume fly ash self compacting concretes. **Cement and Concrete Composites**, v. 30, p. 880-886, 2008.

DOMONE P. L. A review of the hardened mechanical properties of self-compacting concrete. **Cement and Concrete Composites**, v.29, p.1-12, 2007.

DOMONE P. L. Self-compacting concrete: an analysis of 11 years of cases of studies. **Cement and Concrete Composites**, v.28, p.197-208, 2006.

EIGER, L. R. A química a serviço da indústria de concretos pré-fabricados. **Revista Concreto e Construções, Ed. IBRACON**, v. 43. p. 55-58, 2006. Disponível em: <http://www.ibracon.org.br/publicacoes/revistas_ibracon/rev_construcao/revistas.asp>. Acesso em: 22 agosto 2010.

European Federation for Specialist Construction Chemical and Concrete Systems (EFNARC). Specification and guidelines for self-compacting concrete. In: **EFNARC**. 2002. 32p. Disponível em: <<http://www.efnarc.org/pdf/SandGforSCC.PDF>>. Acesso em: 6 janeiro 2010.

European Federation for Specialist Construction Chemical and Concrete Systems (EFNARC). Specification and guidelines for self-compacting concrete. Specification, production and use. In: **EFNARC**. 2005. 63p. Disponível em: <<http://www.efnarc.org/pdf/SCCGuidelinesMay2005.pdf>>. Acesso em: 11 janeiro 2010.

FLATT, R. J. Towards a prediction of superplasticized concrete rheology. **Materials and Structures**, v.37, p.289-300, 2004.

FORMAGINI, Sidiclei. **Dosagem científica e caracterização mecânica de**

concretos de altíssimo desempenho. Rio de Janeiro, 2005. 259p. Tese (Doutorado em Engenharia Civil). COOPE, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Brasil. Disponível em:<http://www.coc.ufrj.br/index.php?option=com_docman&task=doc_details&gid=357>. Acesso em: 12 setembro 2010.

GEBLER, S. H. The effects of high-range water reducers on the properties of freshly mixed and hardened flowing concrete. Boletim RD081-01T. Portland Cement Association, Skokie, Illinois, 1982. Disponível em:<<http://www.cement.org/bookstore>>. Acesso em: 28 Maio 2011.

GEIKER, M. R; Brandl, M.; Thrane, L. N.; Nielsen, L. F. On the effect of coarse aggregate fraction and shape on the rheological properties of self-compacting concrete. **Cement, Concrete and Aggregates**. v. 24, n. 1, p. 3-6, 2002.

GEORGIADIS, A. S.; Anagnostopoulos, N. S.; Sideris, K. K. Mechanical characteristics of self-compacting concretes produced with different filler materials. In: **5th International RILEM Symposium on Self-Compacting Concrete: 2007**, Ghent. Symposium. Disponível em:<<http://www.rilem.net>>. Acesso em: 28 maio 2011.

GIANNOTTI, Fernanda da Silva. **Estudo dos concretos de alto desempenho frente à ação de cloretos.** São Carlos, 2006. 236p. Tese (Doutorado em Ciência e Engenharia dos Materiais). USP, Universidade de São Paulo Interunidades EESC-IFSC-IQSC, Brasil. Disponível em:<<http://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/88/88131/tde-26072006-135429/fr.php>>. Acesso em: 25 junho 2011.

GIOVANNETTI, Edio. **Princípios básicos sobre concreto fluido.** São Paulo: PINI: IBRACON, 1989. 83p.

GJØRV, Odd. E. Important test methods for evaluation of reinforced concrete durability. In: *Concrete Technology Past, Present, and Future: 1994*, Detroit.

Proceedings of V. Mohan Malhotra Symposium. Detroit, Michigan: American Concrete Institute, 1995, p. 545-574.

GOMES, Paulo César Correia; Barros, Alexandre Rodrigues. **Métodos de dosagem de concreto autoadensável.** São Paulo: PINI, 2009. 165p.

GONÇALVES, Jardel Pereira. **Utilização do resíduo de corte de granito (RSG) como adição para a produção de concretos.** Porto Alegre. 2000. 120p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil). Escola de Engenharia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Brasil. Disponível em: <<http://www.lume.ufrgs.br>>. Acesso em: 27 outubro 2010.

Guidelines for Testing Fresh Self-compacting Concrete. European Research Project: Measurement of properties of fresh self-compacting concrete. Principal Author: G. de Schutter. 2005. 23p. Disponível em: <<http://www2.cege.ucl.ac.uk/research/concrete/Testing-SCC/Guidelines%20for%20testing.pdf>>. Acesso em: 11 janeiro 2010.

GUIMARÃES, A. T. C.; Recena, F. A. P.; Pereira, F. M. Produtos de cimento Portland In: ISAIA, G. C., Editor. In: **Materiais de construção civil e princípios de ciência e engenharia de materiais.** São Paulo, 2007, v. 2, p. 945-982.

HAMEED, Mohammed Abdul. **A study of mix design and durability of self compacting concrete.** Dhahran. 2005. 111p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil). King Fahd University of Petroleum and Minerals, Saudi Arabia. Disponível em: <<http://eprints.kfupm.edu.sa/9618/>>. Acesso em: 27 outubro 2010.

HARTMANN, C. T.; Helene, P. R. L. Avaliação de aditivos superplastificantes base policarboxilatos destinados a concretos de cimento portland. São Paulo: EPUSP, 2003. 22p. (Boletim Técnico, BT/PCC 330).

HELENE, P. Dosagem dos concretos de cimento portland, In: ISAIA, G. C., Editor. In: **Concreto: ensino, pesquisa e realizações.** São Paulo, 2005, v. 1, p. 439-471.

HELENE, Paulo; Terzian, Paulo. **Manual de dosagem e controle do concreto**. São Paulo: PINI, 1992. 349p.

HELMUTH, R.; Hills, L. M.; Whiting, D. A.; Bhattacharja, S. Abnormal concrete performance in the presence of admixtures. Skokie, Illinois: PCA, 1995, 92p. (Research and Development information, RP333/ n°20 06).

HU, J.; Wang K. Effects of size and uncompacted voids of aggregate on mortar flow ability. **Journal of Advanced Concrete Technology**, v. 5, p. 75-85, 2007.

JIANG, Y. Q.; Gong, M. Z. Effect of superplasticizer type on early age hydration of cement. In: **1th International Conference on Microstructure Related Durability of Cementitious Composites**: 2008, Nanjin. Conference. Disponível em: <<http://www.rilem.net>>. Acesso em: 01 maio 2011.

KLEIN, Nayara Soares. **Influência da substituição da areia natural pela areia de britagem no comportamento do concreto auto-adensável**. Londrina, 2008. 155p. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Edificações e Saneamento). Centro de Tecnologia e Urbanismo, Universidade Estadual de Londrina, Brasil. Disponível em: <<http://www.uel.br/pos/enges/dissertacoes/45.pdf>>. Acesso em: 1 setembro 2010.

KOEHLER, E. P.; Fowler, D. W. Final Report. ICAR Project 108-2F: Aggregates in self-consolidating concrete. Texas, 2007. 353p. Disponível em:< [http://www.icar.utexas.edu/publications/108/ICAR%20108-2F%20\(Final%20Report\).pdf](http://www.icar.utexas.edu/publications/108/ICAR%20108-2F%20(Final%20Report).pdf)>. Acesso em: 01 junho 2011.

MÄDER, U.; Schober, I.; Wombacher, F.; Ludirja, D. Polycarboxylate polymers and blends in different cements. **Cement, Concrete, and Aggregates**. v. 26, n. 2, p. 1-5, 2004.

MANUEL, Paulo Jorge Miguel. **Estudo da influência do teor de argamassa no desempenho de concretos autoadensáveis**. Porto Alegre, 2005. 178p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil). Escola de Engenharia, Universidade

Federal do Rio Grande do Sul, Brasil. Disponível em: <www.lume.ufrgs.br/bitstream/handle/10183/8142/000568918.pdf>. Acesso em: 10 fevereiro 2010.

MASLEHUDDIN, M.; Rasheeduzzafar; Al-Amoudi, O. S. B.; Al-Mana, A. I. Concrete durability in a very aggressive environment. In: **Concrete Technology Past, Present, and Future**: 1994, Detroit. Proceedings of V. Mohan Malhotra Symposium. Detroit, Michigan: American Concrete Institute, 1995, p. 191-211.

MEHTA, Povindar Kumar; Monteiro, Paulo J.M. **Concreto**: estrutura, propriedades e materiais. São Paulo: PINI, 1994. 573p.

MELO, Karoline Alves. **Contribuição à dosagem de concreto auto-adensável com adição de fíler calcário**. Florianópolis, 2005. 184p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil). Universidade Federal de Santa Catarina, Brasil. Disponível em: <<http://www.tede.ufsc.br/teses/PECV0330.pdf>>. Acesso em: 17 agosto 2010.

MIRANDA, Cristiane Richard. **Pastas de cimento de alta compacidade para poços de petróleo** – Processo de formulação, propriedades reológicas, resistência mecânica e química. Rio de Janeiro. 2008. 290p. Tese (Doutorado em Ciências de Materiais do Instituto de Engenharia). Instituto Militar de Engenharia, Brasil. Disponível em: <www.ime.eb.br/arquivos/teses/se4/cm/Cristiane_Richard_de_Miranda.pdf>. Acesso em: 28 julho 2010.

MOOSBERG-BUSTNES, H.; Lagerblad B.; Forssberg. E. The function of fillers in concrete. **Materials and Structures**, v.37, p.74-81, 2004.

NANTHAGOPALAN P., Santhanam M. Fresh and hardened properties of self-compacting concrete produced with manufactured sand. **Cement and Concrete Composites**, v.33, p.353-358, 2011.

NEPOMUCENO, A. A. Mecanismos de transporte de fluidos no concreto, In: ISAIA,

G. C., Editor. In: **Concreto: ensino, pesquisa e realizações**. São Paulo, 2005, v. 2, p. 793-827.

NEVILLE, Adam M. **Propriedades do Concreto**. 2. ed. São Paulo: PINI, 1997. 738p.

NIKNAMUBANZI, P. C.; Aïtcin, P. C. Cement and superplasticiser combinations: compatibility and robustness. **Cement, Concrete and Aggregates**. v. 26, n. 2, p. 1-8, 2004.

NUNES, Sandra Conceição Barbosa. **Betão autocompactável: tecnologia e propriedades**. Porto. 2001. 198p. Dissertação (Mestrado em Estruturas de Engenharia Civil). Faculdade de Engenharia, Universidade do Porto, Portugal. Disponível em: <<http://repositorioaberto.up.pt/bitstream/10216/11114/2/Texto%20integral.pdf>>. Acesso em: 25 janeiro 2010.

OKAMURA, H.; Ouchi M. Self-compacting Concrete. **Journal of Advanced Concrete Technology**, Japan, v.1, p. 5-15, 2003. Disponível em: <<http://www.engforum.com/articles/articles/selfconcrete.pdf>>. Acesso em: 5 janeiro 2010.

OLIVEIRA ANDRADE, J. J. Propriedades físicas e mecânicas dos materiais, In: ISAIA, G. C., Editor. In: **Materiais de construção civil e princípios de ciência e engenharia de materiais**. São Paulo, 2007, v. 1, p. 203-236.

OLIVEIRA, L. A. Pereira de; Gomes J. P. de Castro; Lanzinha J. C.; Dinis Almeida M. S. Estudo de um caso de anomalias ocorridas num betão auto compactável. In: **1º Encontro Nacional sobre Patologia e Reabilitação de Edifícios – PATORREB: 2003**, Porto. 10p. Disponível em: <<http://www.cmade.ubi.pt>>. Acesso em: 5 julho 2011.

OUCHI M.; Nakamura S.; Osterberg T.; Hallberg S.; Lwin M. Applications of self-compacting concrete in Japan, Europe and United States. **ISHPC: 2003**, 20p.

Disponível em: <www.fhwa.dot.gov/bridge/scc.pdf>. Acesso em: 15 fev. 2010.

PARRA, C.; Valcuende, M.; Benloch, J. Mechanical properties of self-compacting concretes. In: **5th International RILEM Symposium on Self-Compacting Concrete: 2007**, Ghent. Symposium. Disponível em: <<http://www.rilem.net>>. Acesso em: 15 maio 2011.

PEREIRA, Tobias Azevedo da Costa. **Concreto auto-adensável, de alta resistência, com baixo consumo de cimento Portland e com adições de fibra de lã de rocha ou poliamida**. São Carlos. 2010. 281p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil). Escola de Engenharia, Universidade de São Paulo, Brasil. Disponível em: <<http://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/18/18134/tde-14012011-104648/es.php>>. Acesso em: 5 maio 2011.

PINTO, Carlos de Sousa. **Curso básico de mecânica dos solos em 16 aulas**. São Paulo: Oficina de Textos, 2000. 247p.

RECENA, Fernando A. Piazza. **Dosagem e controle da qualidade de concretos convencionais de cimento Portland**. 2^a ed. Porto Alegre: EDI-PUCRS, 2011. 128p.

RECENA, Fernando A. Piazza. **Conhecendo argamassa**. 1^a reimpressão. Porto Alegre: EDI-PUCRS, 2011a. 192p.

REPETTE, W. L. Concretos de última geração: presente e futuro, In: ISAIA, G. C., Editor. In: **Concreto: ensino, pesquisa e realizações**. São Paulo, 2005, v. 2, p. 1509-1550.

REZENDE, L. V. S.; Djanikian, J. G. Resistência ao cisalhamento do concreto fresco por compressão triaxial. São Paulo: EPUSP, 1999. 34p. (Boletim Técnico, BT/PCC 231).

RIXON, Roger; Mailvaganam, Noel. **Chemical admixtures for concrete**. 3^a ed. London: Taylor & Francis e-library. 1999. 437p.

ROUSSEL, N. Correlation between yield stress and slump: comparison between numerical correlation simulations and concrete rheometers results. **Materials and Structures**. v. 39, p. 501-509, 2006.

ROY, Della M.; Silsbee, Michael R. Novel Cements and Cement Products for Applications in the 21st Century. In: **Concrete Technology Past, Present, and Future**: 1994, Detroit. Proceedings of V. Mohan Malhotra Symposium. Detroit, Michigan: American Concrete Institute, 1995, p. 349-382.

SCHRAMM, Gebhard. **Reologia e Reometria**: fundamentos teóricos e práticos. 1ª reimpressão. São Paulo: Artliber, 2006. 232p.

SHILSTONE, James M.; Shilstone, James M. Jr. Needed – Paradigm shifts in the technology for normal strength concrete. In: **Concrete Technology Past, Present, and Future**: 1994, Detroit. Proceedings of V. Mohan Malhotra Symposium. Detroit, Michigan: American Concrete Institute, 1995, p. 61-84.

SKARENDAHL, ÅKE. Rilem Technical Committee. Final report of RILEM TC 188-CSC 'Casting of self compacting concrete'. **Materials and Structures**, v.39, p.937-954, 2006.

SONEBI, M.; Ibrahim, R. Assessment of the durability of medium strength SCC from its permeation properties. In: **5th International RILEM Symposium on Self-Compacting Concrete**: 2007, Ghent. Symposium. p. 677-682. Disponível em: <<http://www.rilem.net>>. Acesso em: 15 maio 2011.

TUTIKIAN, Bernardo Fonseca. **Método para dosagem de concretos autoadensáveis**. Porto Alegre. 2004. 148p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil). Escola de Engenharia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Brasil. Disponível em: <<http://www.lume.ufrgs.br>>. Acesso em: 27 maio 2009.

TUTIKIAN, Bernardo Fonseca. **Proposição de um método de dosagem experimental para concretos autoadensáveis**. Porto Alegre. 2007. 167p. Tese

(Doutorado em Engenharia Civil). Escola de Engenharia, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Brasil. Disponível em: <<http://www.lume.ufrgs.br>>. Acesso em: 27 maio 2009.

TUTIKIAN, Bernardo Fonseca; Dal Molin, Denise Carpena. **Concreto Autoadensável**. São Paulo: PINI, 2008. 140p.

WESTERHOLM M., Lagerblad B., Silwerbrand, J., Forssberg, E. Influence of fine aggregate characteristics on the rheological properties of mortars. **Cement and Concrete Composites**, v.30, p.274-282, 2008.

ZANETTI, J. J. Falhas nos processos de controle tecnológico em laboratório que comprometem os resultados de resistência dos concretos. **Revista Concreto e Construções**, Ed. **IBRACON**, n. 60. p. 31-39. 2010. Disponível em: <http://www.ibracon.org.br/publicacoes/revistas_ibracon/rev_construcao/revistas.asp>. Acesso em: 20 fevereiro 2011.

ZERBINO, R., Barragán, B., Garcia, T., Agulló, L., Gettu, R. Workability tests and rheological parameters in self self-compacting concrete. **Materials and Structures**, v.42, p.947-960, 2009.

ZHU W., Bartos P. J. M. Permeation properties of self-compacting concrete. **Cement and Concrete Research**, v.33, p.921-926, 2003.

ZINGG A., Winnefeld F., Holzer, L., Pakusch, J., Becher, S., Figi, R., Gauckler, L. Interaction of polycarboxilate-based superplasticizers with cements containing different C₃A amounts. **Cement and Concrete Composites**, v.31, p.153-162, 2009.

ANEXOS

Estimativa do teor de argamassa seca conforme Recena (2011):

1. A massa de agregados graúdos utilizada na estimativa foi igual a 3 kg (conforme definido no proporcionamento de agregados graúdos no item 4.2.4.2., 44% de brita 0 e 56% de brita 1);
2. O volume ocupado pelos agregados foi igual a 2,04 dm³ (material misturado e lançado sem compactação em um recipiente cilíndrico de 1 dm de raio por 0,65 dm de altura). Esse valor foi definido como o volume teórico de concreto;
3. A partir do volume teórico de concreto de 2,04 dm³ que corresponde a uma massa de concreto 4,69 kg (considerando como massa específica do concreto no estado fresco o valor de 2,30 kg/dm³);
4. Se, dos teóricos 4,69 kg de concreto, 3 kg são referentes a massa de agregados graúdos, temos o quociente de 3 kg por 4,69 kg, igual a 64%, que resulta no teor de agregado graúdo e 36% no teor de argamassa seca;
5. Aplica-se a correção de 20% para o afastamento dos grãos de brita, que estão encostados no ensaio e necessitam mobilidade, chega-se aos 43% de teor de argamassa seca.

Tabela A.2: Teste experimental do traço rico 1:3 para determinação do teor de argamassa seca que garanta a coesão da mistura e resulte em um valor de consistência do ensaio de tronco de cone igual a 250 ± 20 mm.

Teor de argamassa seca (α)	Cimento (g)	Areia fina (g)	Areia média (g)	Brita 0 (g)	Brita 1 (g)	Água (g)	Abatimento (mm)	H (%)	Observação
43%	5000	1080	2520	5016	6384	2000	110	10,0%	-----
43%	-	-	-	-	-	200	170	11,0%	Perda de coesão da mistura
43%	5000	1080	2520	5016	6384	2200	-	11,0%	Somatório das correções
45%	182	164	382	0	0	80	160	11,0%	Ajuste de α e H%
45%	-	-	-	-	-	100	185	11,5%	Perda de coesão da mistura
45%	5182	1244	2902	5016	6384	2380	-	11,5%	Somatório das correções
47%	195	176	410	0	0	89	160	11,5%	Ajuste de α e H%
47%	-	-	-	-	-	200	200	12,4%	Perda de coesão da mistura
47%	5377	1420	3312	5016	6384	2669	-	12,4%	Somatório das correções
49%	211	189	443	0	0	104	210	12,4%	Ajuste de α e H%
49%	-	-	-	-	-	200	235	13,3%	Baixa perda de coesão da mistura
49%	5588	1609	3755	5016	6384	2973	-	13,3%	Somatório das correções
51%	228	206	479	0	0	121	245	13,3%	Ajuste de α e H%
51%	-	-	-	-	-	200	255	14,2%	Não houve perda de coesão da mistura

APÊNDICE

Os custos dos materiais utilizados neste trabalho foram baseados em valores orçados na região da grande Porto Alegre em julho de 2011.

Tabela A.1: Custos dos materiais por kg (R\$/kg).

Materiais	Custo (R\$/kg)
cimento CPIV 32 POZ	0,340
areia fina	0,032
areia média	0,029
brita 0	0,020
brita 1	0,021
aditivo plastificante	3,104
aditivo superplastificante	11,452
água potável	0,025

