

**MÉTODO PARA DOSAGEM DE CONCRETOS AUTO-
ADENSÁVEIS**

Bernardo Fonseca Tutikian

Porto Alegre
agosto 2004

BERNARDO FONSECA TUTIKIAN

**MÉTODO PARA DOSAGEM DE CONCRETOS AUTO-
ADENSÁVEIS**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em
Engenharia Civil da Universidade Federal do Rio Grande do Sul,
como parte dos requisitos para obtenção do título de Mestre em
Engenharia na modalidade Acadêmico

Porto Alegre

agosto 2004

TUTIKIAN, Bernardo Fonseca

Método para dosagem de concretos auto-adensáveis /
Bernardo Fonseca Tutikian. – Porto Alegre:
PPGEC/UFRGS, 2004.

n p.

Dissertação de Mestrado, Programa de Pós-Graduação
em Engenharia Civil da Universidade Federal do Rio
Grande do Sul; Mestre em Engenharia. Orientadores:
Denise Carpena Coitinho Dal Molin e Ruy Alberto
Cremonini.

1. Construção Civil I. Método para Dosagem de
Concretos Auto-Adensáveis

CCAA2

BERNARDO FONSECA TUTIKIAN

**MÉTODO PARA DOSAGEM DE CONCRETOS AUTO-
ADENSÁVEIS**

Esta dissertação de mestrado foi julgada adequada para a obtenção do título de MESTRE EM ENGENHARIA e aprovada em sua forma final pelo professor orientador e pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

Porto Alegre, 04 de agosto de 2004

Prof.a Denise Carpena Coitinho Dal Molin
Dr.a pela EPUSP
Orientadora

Prof. Ruy Alberto Cremonini
Dr. pela EPUSP
Orientador

Prof. Américo Campos Filho
Coordenador do PPGEC/UFRGS

BANCA EXAMINADORA

Prof. André Geyer (UFG)
Dr. pela UFRGS

Prof. Geraldo Isaía (UFSM)
Dr. pela UFRGS

Prof.a Fernanda Pereira Viera (PUCRS)
Dr.a pela UFRGS

Dedico este trabalho aos meus pais, à minha namorada
Renata e aos meus orientadores.

AGRADECIMENTOS

Agradeço ao Prof. Ruy Cremonini, orientador deste trabalho pelas longas e produtivas discussões técnicas, algumas fora da universidade e em horários especiais.

À minha paciente orientadora Prof.a Denise Dal Molin, que muito me acolheu em sua (nossa) sala de trabalho, muitas vezes fora de horário.

À professora Ângela Masuero, que também me acolheu em nossa sala durante este período e propôs a colocação de uma cadeira personalizada com meu nome.

A todos os professores do NORIE por todo o conhecimento compartilhado na graduação e na pós-graduação, em especial Carin Schmitt, Luís Carlos Bonin, Carlos Formoso e Miguel Satler.

Ao amigo Prof. André Geyer, pelas dicas e incentivo neste assunto, que enquanto era uma novidade para mim, já era estudado na UFG.

A minha família, que sempre me apoiou e incentivou nesta árdua empreitada, em especial aos meus pais e colegas, mestre em engenharia Cláudio Morel Tutikian e arquiteta Maria Isabel Tutikian.

À minha namorada Renata Freire de Souza, pelo auxílio em alguns trabalhos deste curso, atenção, apoio e compreensão durante este período e outros de minha vida.

Aos seus pais, meus futuros sogros, pelos jantares e as relaxantes sessões de cinema em casa.

Aos amigos e colegas do NORIE, em especial Daniel Pagnussat, Alexandre Vargas, Sandro Mendes, Elaine Moreira, Edna Possan, Ana Paula Kirchheim, Simone Venquiaruto e Geilma Vieira.

Aos meus bolsistas, Rafael Kuhn e Sílvio Brescovit, que muito me ajudaram e se tornaram peças importantes neste trabalho.

Aos funcionários do laboratório do NORIE, Aírton e Éderson, pelas concretagens e comemorações noite adentro.

E por fim, às empresas que doaram material para a realização do exaustivo mas recompensador trabalho experimental desta dissertação: MBT Degussa, especialmente ao mestre em engenharia Fábio Vecili, Companhia de Cimento Itambé, em especial ao engenheiro Renato Tortorelli e Irmãos Ciocari Ltda, em especial ao Silvério.

“O iluminado sofre repressão veemente do
mediocre.”

Albert Einstein

RESUMO

TUTIKIAN, B.F. Método para dosagem de concretos auto-adensáveis. 2004. 149p. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, UFRGS, Porto Alegre.

O concreto auto-adensável (CAA) vem sendo descrito por muitos pesquisadores como uma grande revolução ocorrida na tecnologia do concreto. Sua utilização, apesar de estar aumentando consideravelmente, ainda é pequena, se forem analisadas todas as vantagens que este material permite obter. Um dos motivos para esta sub-utilização é a falta de métodos de dosagem experimental, que permite a determinação da proporção exata dos materiais, de forma econômica e racional.

Neste trabalho foi proposto um método de dosagem para concretos auto-adensáveis, com materiais locais e econômicos. Para comprovar a eficiência do método de dosagem proposto, foram realizados CAA com materiais finos distintos, dois pozolânicos (metacaulim e cinza de casca de arroz) e um não pozolânico (fíler calcáreo), primeiramente com, e, após, sem aditivo modificador de viscosidade (VMA).

Observou-se que os CAA com cinza de casca de arroz foram os mais viáveis economicamente. Também observou-se que a utilização do VMA não interfere no custo dos concretos, porém reduz a relação água/aglomerante, permitindo, assim, a possibilidade de redução de consumo de aglomerantes, para uma mesma faixa de resistência à compressão. Após este estudo experimental, observou-se que é possível dosar CAA através do método proposto, de forma que o custo deste, para uma mesma faixa de resistência à compressão, seja próximo ou até inferior ao do concreto convencional.

Palavras-chave: concreto auto-adensável, método de dosagem, aditivo modificador de viscosidade, fíler calcáreo, metacaulim, cinza de casca de arroz.

ABSTRACT

TUTIKIAN, B.F. Mix design method for self compacting concrete. 2004. 149p. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, UFRGS, Porto Alegre.

Self compacting concrete has been described by many researchers as a big revolution in concrete technology. Its use is increasing day by day, but is still limited, if one takes into consideration all the advantages that the use of this material can afford. One of the reasons for its limited use is the lack of methods for experimental design that allow the determination of the precise amount of material in an economical and rational way.

The present paper proposes a method for the proportion of self compacting concrete, using local and economics materials. To prove the effectiveness of this proposed method, some experimental in self compacting concrete with different powder materials was carried out, two pozolanics (metacaulim and rice husk ash) and one non-pozolanic (calcareous filer), initially with, and, afterwards, without viscosity modify admixture (VMA).

It was notice that the self compacting with rice husk ash were the most economical material. It was also noticed that the use of viscosity modify admixture does not interfere into the cost of concrete and reduces the ratio water/cimenticious material what allows the reduction of the cimenticious material consumption for the same strength level. Thus, after this experimental study, It was concluded that the proposed method for design self compacting concrete is feasible and its cost price is the same or even less than the conventional concrete, for the same strength level.

Key-words: self compacting concrete, design method, viscosity modify admixture, calcareous filer, metacaulim, rice husk ash.

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	p.21
1.1 IMPORTÂNCIA DA PESQUISA	p.21
1.2 OBJETIVOS DA PESQUISA	p.24
1.3 DELIMITAÇÕES	p.25
1.4 ESTRUTURA DA PESQUISA.....	p.25
2 CONCRETO AUTO-ADENSÁVEL (CAA)	p.27
2.1 DEFINIÇÃO	p.27
2.2 HISTÓRICO	p.27
2.3 VANTAGENS	p.33
2.4 UTILIZAÇÃO DO CAA	p.35
2.5 TRABALHABILIDADE DO CAA	p.43
2.5.1 Considerações iniciais	p.43
2.5.2 <i>Slump flow test</i>	p.45
2.5.2.1 Introdução	p.45
2.5.2.2 Execução do ensaio	p.46
2.5.3 <i>Slump flow T_{50cm} test</i>	p.48
2.5.4 <i>V-funnel test</i>	p.49
2.5.4.1 Introdução	p.49
2.5.4.2 Execução do ensaio.....	p.50
2.5.5 <i>L-box test</i>	p.52
2.5.5.1 Introdução	p.52
2.5.5.2 Execução do ensaio.....	p.53
2.5.6 <i>U-box test</i>	p.55
2.5.6.1 Introdução	p.55
2.5.6.2 Execução do ensaio.....	p.56
2.5.7 <i>Fill-box test</i>	p.58

2.5.7.1	Introdução	p.58
2.5.7.2	Execução do ensaio.....	p.59
2.5.8	<i>U-shaped pipe test</i>	p.60
2.5.8.1	Introdução	p.60
2.5.8.2	Execução do ensaio.....	p.61
2.5.9	<i>Orimet test</i>	p.62
2.5.9.1	Introdução	p.62
2.5.9.2	Execução do ensaio.....	p.63
2.5.10	<i>J-ring test</i>	p.64
2.5.10.1	Introdução	p.64
2.5.10.2	Execução do ensaio.....	p.64
2.5.11	Considerações finais	p.66
3	MÉTODOS DE DOSAGEM PARA CAA	p.68
3.1	INTRODUÇÃO	p.68
3.2	MÉTODO DE DOSAGEM PROPOSTO POR OKAMURA (1995)	p.69
3.2.1	Descrição do método	p.69
3.2.2	Comentários do método	p.72
3.3	MÉTODO DE DOSAGEM PROPOSTO POR NAN SU <i>ET AL.</i> (2001)	p.72
3.3.1	Descrição do método	p.72
3.3.2	Comentários do método	p.76
3.4	MÉTODO DE DOSAGEM PROPOSTO POR GOMES (2002)	p.77
3.4.1	Descrição do método	p.77
3.4.2	Comentários do método	p.79
4	MÉTODO DE DOSAGEM PROPOSTO	p.81
4.1	INTRODUÇÃO	p.81
4.2	MÉTODO DE DOSAGEM IPT/EPUSP PARA CONCRETOS CONVENCIONAIS	p.82
4.3	DESENVOLVIMENTO DO MÉTODO DE DOSAGEM PARA CAA	p.90
4.3.1	Introdução	p.90

4.3.2 Materiais constituintes	p.90
4.3.3 Procedimento	p.94
4.3.4 Mistura dos agregados graúdos	p.101
4.3.5 Tempo de mistura do CAA	p.102
5 TRABALHO EXPERIMENTAL	p.103
5.1 DESCRIÇÃO DO PROCEDIMENTO	p.103
5.2 ESCOLHA DOS MATERIAIS	p.103
5.3 DETERMINAÇÃO DO TEOR DE ARGAMASSA SECA	p.106
5.4 CÁLCULO DOS TRAÇOS DOS CAA	p.106
5.5 RESULTADOS	p.116
5.5.1 Curvas de dosagem	p.116
5.5.2 Custo dos concretos em função da resistência à compressão	p.121
5.5.2.1 Idade de ruptura dos corpos-de-prova aos 28 dias	p.122
5.5.2.2 Idade de ruptura dos corpos-de-prova aos 63 dias	p.129
5.5.3 Custo em R\$/MPa dos concretos em função dos valores de resistência à compressão aos 28 e 63 dias	p.132
5.5.4 Custo (R\$) dos concretos em função do traço '1:m' aos 3, 7, 28 e 63 dias	p.134
6 CONSIDERAÇÕES FINAIS	p.139
6.1 CONCLUSÕES	p.139
6.2 SUGESTÕES PARA FUTUROS TRABALHOS	p.141
REFERÊNCIAS	p.142

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: exsudação de concretos sem aditivos (fonte: COLLEPARDI, 2001, p.12)	p.28
Figura 2: exsudação de concretos com aditivos superplastificante (fonte: COLLEPARDI, 2001, p.12)	p.29
Figura 3: movimento do agregado graúdo (fonte: OKAMURA, 1997, p.51)	p.31
Figura 4: produção anual de CAA no Japão, de 1990 até 1997 (fonte: OUCHI, 1999) ..	p.32
Figura 5: estrutura em forma de 'iglu', concretada com CAA (fonte: BERNABEU e LABORDE, 2000, p.11)	p.39
Figura 6: CAA sem segregação (MBT, 2004)	p.46
Figura 7: CAA tendendo a segregar (MBT, 2004)	p.46
Figura 8: CAA segregando (MBT, 2004)	p.46
Figura 9: ensaios do <i>slump flow test</i> com o <i>slump flow T_{50cm} test</i>	p.49
Figura 10: <i>v-funnels</i> (fonte: GOMES, 2002, p.10, adaptado)	p.50
Figura 11: <i>v-funnel</i> sendo utilizado	p.51
Figura 12: medidas do <i>l-box</i> recomendadas (fonte: EFNARC, 2002, p.27)	p.54
Figura 13: ensaio do <i>l-box</i> em andamento	p.55
Figura 14: medidas do <i>u-box</i> recomendadas (fonte: EFNARC, 2002, p.28)	p.56
Figura 15: ensaio do <i>u-box</i> em andamento	p.57
Figura 16: medidas do <i>fill-box</i> recomendadas (fonte: EFNARC, 2002, p.29)	p.59
Figura 17: medidas do <i>u-shaped pipe</i> recomendadas e forma após desfôrma (fonte: GOMES, 2002, p.71)	p.61
Figura 18: ensaio do <i>orimet test</i> em conjunto com o <i>j-ring test</i> (fonte: FURNAS, 2004, método <i>orimet</i> , p.7)	p.63
Figura 19: ensaios do <i>slump flow test</i> com a complementação do <i>j-ring test</i> (fonte: EFNARC, 2002, p.23)	p.65
Figura 20: esquema do procedimento de dosagem (fonte: OKAMURA e OUCHI, 2003, p.6)	p.70
Figura 21: comparação da proporção dos materiais do concreto convencional e auto-adensável (fonte: OKAMURA e OUCHI, 2003, p.5)	p.70

Figura 22: <i>slump flow</i> para argamassa (fonte: OKAMURA e OUCHI, 2003, p.7)	p.71
Figura 23: <i>v-funnel</i> para argamassa (fonte: OKAMURA e OUCHI, 2003, p.7)	p.71
Figura 24: metodologia de dosagem de Gomes (fonte: GOMES, 2002, p.67).....	p.78
Figura 25: curvas médias de correlação entre resistências à compressão e relação água/cimento para cimento Portland comum CP 32 (fonte: HELENE e TERZIAN, 1992, p.238)	p.85
Figura 26: diagrama de dosagem ou modelo de comportamento	p.85
Figura 27: aspecto do concreto com teor ideal de argamassa seca (fonte: HELENE e TERZIAN, 1992, p. 257)	p.89
Figura 28: passo-a-passo para a dosagem do CAA	p.95
Figura 29: custos globais dos traços do CAA e do concreto convencional	p.116
Figura 30: curva de dosagem para o concreto convencional referência	p.117
Figura 31: curva de dosagem para o CAA com fíler calcáreo, sem VMA	p.118
Figura 32: curva de dosagem para o CAA com fíler calcáreo, com VMA	p.118
Figura 33: curva de dosagem para o CAA com metacaulim, sem VMA	p.119
Figura 34: curva de dosagem para o CAA com metacaulim, com VMA	p.119
Figura 35: curva de dosagem para o CAA com cinza de casca de arroz, sem VMA	p.120
Figura 36: curva de dosagem para o CAA com cinza de casca de arroz, com VMA	p.120
Figura 37: consumo de cimento (kg/m ³) dos concretos com $f_c=30$ MPa, variando as idades de ruptura	p.122
Figura 38: custo (R\$) dos concretos de $f_c=20$ MPa aos 28 dias	p.123
Figura 39: custo (R\$) dos concretos de $f_c=30$ MPa aos 28 dias	p.124
Figura 40: custo (R\$) dos concretos de $f_c=40$ MPa aos 28 dias	p.128
Figura 41: custo (R\$) dos concretos de $f_c=20$ MPa aos 63 dias	p.130
Figura 42: custo (R\$) dos concretos de $f_c=30$ MPa aos 63 dias	p.131
Figura 43: custo (R\$) dos concretos de $f_c=40$ MPa aos 63 dias	p.132
Figura 44: custo (R\$/MPa) dos concretos em função da resistência à compressão aos 28 dias	p.133

Figura 45: custo (R\$/MPa) dos concretos em função da resistência à compressão aos 63 dias	p.133
Figura 46: custo (R\$) por MPa dos concretos aos 3 dias	p.135
Figura 47: custo (R\$) por MPa dos concretos aos 7 dias	p.136
Figura 48: custo (R\$) por MPa dos concretos aos 28 dias	p.137
Figura 49: custo (R\$) por MPa dos concretos aos 63 dias	p.138

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: traços utilizados no fim dos anos 70 (fonte: COLLEPARDI, 2001, p.11)	p.30
Tabela 2: traço do CAA utilizado em <i>Chamarande</i> , França (fonte: SÖDERLIND e CLAESON, 2000, p.5; BERNABEU e LABORDE, 2000, p.10)	p.36
Tabela 3: traço do CAA utilizado em <i>Bretonneau</i> , França (fonte: SÖDERLIND e CLAESON, 2000, p.6)	p.36
Tabela 4: traço do CAA utilizado em <i>Norrköping</i> , Suécia (fonte: SÖDERLIND e CLAESON, 2000, p.9)	p.37
Tabela 5: traço do CAA utilizado no túnel <i>Oresund</i> (fonte: BERNABEU e LABORDE, 2000, p.7)	p.38
Tabela 6: traço do CAA utilizado na estrutura em 'iglu' (fonte: BERNABEU e LABORDE, 2000, p.13)	p.38
Tabela 7: traço do CAA utilizado na auto-estrada de <i>Lyon</i> , França (fonte: BERNABEU e LABORDE, 2000, p.15)	p.40
Tabela 8: traço do CAA utilizado na ponte da auto-estrada de <i>Vierzon</i> , França (fonte: SÖDERLIND e CLAESON, 2000, p.5; BERNABEU e LABORDE, 2000, p.19)	p.40
Tabela 9: traço do CAA utilizado na ponte de <i>Motala</i> , Suécia (fonte: BERNABEU e LABORDE, 2000, p.21)	p.41
Tabela 10: traço do CAA utilizado na ponte de <i>Arboga</i> , Suécia (fonte: BERNABEU e LABORDE, 2000, p.22)	p.41
Tabela 11: aptidões e praticidade dos ensaios para a medição da trabalhabilidade do CAA (fonte: PETERSSON, 1999, p.3, adaptado)	p.43
Tabela 12: limites de resultados para o <i>slump flow test</i> , segundo diversas referências .	p.47
Tabela 13: limites de resultados para o <i>slump flow T_{50 cm} test</i> , segundo diversas referências	p.48
Tabela 14: limites de resultados e dimensões para o <i>v-funnel test</i> , segundo diversas referências	p.52
Tabela 15: limites de resultados e dimensões para o <i>l-box test</i> , segundo diversas referências	p.54
Tabela 16: limites de resultados e dimensões para o <i>u-box test</i> , segundo diversas referências	p.58
Tabela 17: limites de resultados e dimensões para o <i>fill-box test</i> , segundo diversas referências	p.60
Tabela 18: limites de resultados para o <i>orimet test</i> , segundo diversas referências	p.64

Tabela 19: limites de resultados para o <i>j-ring test</i> , segundo diversas referências	p.66
Tabela 20: valores aceitos pela maioria dos pesquisadores para os equipamentos de trabalhabilidade	p.67
Tabela 21: especificações para o CAA (fonte: <i>Japanese Society of Civil Engineering (JSCE) apud SU et al.</i> , 2001, p.1800)	p.73
Tabela 22: resumo das características básicas para o estudo de dosagem (fonte: HELENE e TERZIAN, 1992, p.243)	p.86
Tabela 23: determinação do teor de argamassa seca para o traço 1:5 (brita = 30 kg) (fonte: HELENE e TERZIAN, 1992, p.245)	p.87
Tabela 24: determinação da proporção entre o material fino e o substituído	p.100
Tabela 25: análise química dos aglomerantes utilizados	p.104
Tabela 26: massas específicas e unitárias dos materiais utilizados	p.105
Tabela 27: granulometria dos agregados graúdo e miúdo utilizados	p.105
Tabela 28: determinação do teor de argamassa seca do trabalho experimental	p.106
Tabela 29: traço seco em massa do concreto referência	p.107
Tabela 30: traço seco em massa do CAA com fíler calcáreo, sem VMA	p.108
Tabela 31: traço seco em massa do CAA com fíler calcáreo, com VMA	p.108
Tabela 32: traço seco em massa do CAA com metacaulim, sem VMA	p.109
Tabela 33: traço seco em massa do CAA com metacaulim, com VMA	p.109
Tabela 34: traço seco em massa do CAA com cinza de casca de arroz, sem VMA	p.110
Tabela 35: traço seco em massa do CAA com cinza de casca de arroz, com VMA	p.110
Tabela 36: traços unitários secos em massa dos concretos produzidos	p.112
Tabela 37: consumo dos materiais (kg/m^3) dos concretos produzidos	p.113
Tabela 38: custo unitário dos materiais/ m^3 e total dos concretos produzidos (em R\$) ...	p.114
Tabela 39: custo dos concretos em função dos consumos dos materiais	p.121
Tabela 40: equações e coeficientes de correlação das curvas de dosagem	p.125
Tabela 41: resistências à compressão e ganhos de resistência ao longo do tempo	p.126
Tabela 42: custo dos materiais em reais por MPa nas idades especificadas	p.127

LISTA DE EQUAÇÕES

Equação 1: capacidade de preenchimento 'F'	p.58
Equação 2: quantificação da segregação	p.62
Equação 3: deformabilidade do concreto	p.71
Equação 4: viscosidade do concreto	p.71
Equação 5: deformabilidade da argamassa	p.71
Equação 6: viscosidade da argamassa	p.71
Equação 7: cálculo da massa de agregado graúdo	p.73
Equação 8: cálculo da massa de agregado miúdo	p.73
Equação 9: cálculo do consumo de cimento	p.74
Equação 10: cálculo da quantidade de água requerida pelo cimento	p.74
Equação 11: cálculo dos volumes de cinza volante e escória alto forno	p.74
Equação 12: cálculo da massa total das adições	p.75
Equação 13: cálculo da massa de cinza volante	p.75
Equação 14: cálculo da massa de escória auto-forno	p.75
Equação 15: cálculo da quantidade de água requerida pela cinza volante	p.75
Equação 16: cálculo da quantidade de água requerida pela escória alto-forno	p.75
Equação 17: cálculo da quantidade de água total da mistura	p.75
Equação 18: cálculo da massa do aditivo superplastificante	p.76
Equação 19: cálculo da água presente no aditivo superplastificante	p.76
Equação 20: lei de Abrams para o concreto convencional	p.82
Equação 21: lei de Lyse para o concreto convencional	p.82
Equação 22: lei de Molinari para o concreto convencional	p.82
Equação 23: teor de argamassa seca para o concreto convencional	p.82 e 88
Equação 24: relação cimento:agregados para o concreto convencional	p.82 e 88

Equação 25: consumo de cimento/m ³ em função da massa específica do concreto para o concreto convencional	p.82
Equação 26: consumo de cimento/m ³ em função da massa específica dos materiais para o concreto convencional	p.82
Equação 27: consumo de água/m ³ para o concreto convencional	p.82
Equação 28: custo do concreto/m ³ para o concreto convencional	p.82
Equação 29: lei de Abrams para o CAA com fino não pozolânico	p.95
Equação 30: lei de Lyse para o CAA com fino não pozolânico	p.95
Equação 31: relação entre o consumo de cimento e o traço '1:m' para o CAA com fino não pozolânico	p.95
Equação 32: teor de argamassa seca para o CAA com fino não pozolânico	p.95
Equação 33: relação cimento:agregados para o CAA com fino não pozolânico	p.95
Equação 34: consumo do cimento para o CAA com fino não pozolânico em função da massa específica do concreto	p.95
Equação 35: consumo do cimento para o CAA com fino não pozolânico em função da massa específica dos materiais	p.96
Equação 36: consumo total de água para o CAA com fino não pozolânico	p.96
Equação 37: custo do m ³ do CAA com fino não pozolânico	p.96
Equação 38: lei de Abrams para o CAA com fino pozolânico	p.96
Equação 39: lei de Lyse para o CAA com fino pozolânico	p.96
Equação 40: relação entre o consumo de aglomerantes e o traço '1:m' para o CAA com fino pozolânico	p.96
Equação 41: teor de argamassa seca para o CAA com fino pozolânico	p.96
Equação 42: relação aglomerantes:agregados para o CAA com fino pozolânico	p.96
Equação 43: consumo de aglomerantes para o CAA com fino pozolânico em função da massa específica do concreto	p.96
Equação 44: consumo de aglomerantes para o CAA com fino pozolânico em função da massa específica dos materiais	p.96
Equação 45: consumo de cimento para o CAA com fino pozolânico	p.96

Equação 46: consumo da adição utilizada para o CAA com fino pozolânico	p.96
Equação 47: consumo total de água para o CAA com fino pozolânico	p.96
Equação 48: custo do m ³ do CAA com fino pozolânico	p.96

1 INTRODUÇÃO

1.1 IMPORTÂNCIA DA PESQUISA

Nas civilizações primitivas o homem utilizava como materiais de construção, a pedra, a madeira e o barro. Aos poucos, foram aumentando as exigências do homem, passando a demandar materiais de maior resistência, maior durabilidade e melhor aparência. Assim surgiu o concreto, trabalhável como barro e resistente como pedra (VERÇOSA, 2003, p.2)

O uso do concreto remonta à época dos Romanos, quando era utilizado um material semelhante, tendo como aglomerante uma mistura de cal e cinza vulcânica (pozolana natural), sendo que com este material foram realizadas notáveis obras de engenharia (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE CIMENTO PORTLAND, 1997, p.1).

O concreto sempre foi muito utilizado como material de construção, mas sua utilização vem aumentando consideravelmente, devido ao desenvolvimento de novas tecnologias. O concreto pode ser empregado tanto em ambientes de agressão moderada como em ambientes fortemente agressivos, devido a sua excelente resistência à água. É facilmente moldável em uma variedade de formas e dimensões e é mais barato e disponível no canteiro de obras do que outros materiais de construção (ALVES, 2000, p.1).

O concreto vem sendo empregado em ambientes agressivos, como em plataformas marítimas, estruturas confinadas com resíduos sólidos e líquidos, pontes, edifícios tipo arranha-céus e até em locais com material radioativo. Como estas estruturas em meios agressivos apresentam o custo de manutenção acima do usual e até do aceitável, muito destas misturas deveriam ter sua vida útil de serviço projetada para centenas de anos, ao invés dos 40 a 50 anos normalmente esperados para os concretos convencionais. Para atenderem a este objetivo, os concretos de alto desempenho (CAD), entre outros aspectos, foram desenvolvidos (MEHTA e AÏTCIN, 1990, p.70).

Segundo Mehta e Aïtcin (1990, p.70), se dá muita importância ao concreto de alta resistência (CAR), já que a resistência à compressão é um fator muito importante e o que mais é observado por profissionais da área. Geralmente, utiliza-se alto desempenho como sinônimo

de alta resistência, o que não é verdadeiro em todos os casos. CAD são concretos com uma ou mais propriedades superiores aos concretos convencionais, até então produzidos.

No Japão, em 1988, foi desenvolvido um concreto de alto desempenho com uma excelente deformabilidade no estado fresco e alta resistência à segregação. Este concreto, que possui a capacidade de se moldar nas fôrmas sem vibração ou compactação, passando coeso através das armaduras (ARAÚJO *et al.*, 2003, p.1), foi denominado de concreto auto-adensável (CAA) (SU *et al.*, 2001, p.1); (COPPOLA, 2000, p.42); (OKAMURA, 1997, p.1). A evolução é significativa, já que se passou do concreto convencional com quatro componentes básicos, cimento, agregados miúdo e graúdo e água, para o auto-adensável com seis componentes, somando-se a estes materiais os aditivos (superplastificantes e, ocasionalmente, modificadores de viscosidade) e os materiais finos (pozolânicos ou não) (ARAÚJO *et al.*, 2003, p.2). A maneira de modificar a trabalhabilidade do concreto, mantendo-se inalteradas as características do material endurecido, tem muita importância prática para os profissionais da construção civil. Para um mesmo desempenho, o construtor apreciará misturas mais trabalháveis, que requerem menor tempo e esforço e, conseqüentemente, menor custo de lançamento (PETRUCCI, 1998, p.1).

Nestes últimos anos, este concreto está se difundindo por vários países, para as mais diversas aplicações (BOUZOUBAÂ e LACHEMI, 2001, p.1), como na China, onde o CAA de alta resistência vem sendo estudado e utilizado desde 1995 nas ferrovias e em pontes (XIE *et al.*, 2002, p.477).

Há uma lacuna muito grande nesta área, que é a inexistência de métodos experimentais de dosagem para CAA. Hoje, para dosar um CAA, pesquisadores valem-se de métodos baseados em tabelas prontas, que foram produzidas, muitas vezes, em outros países, com materiais bem diferentes dos nossos. Ou seja, necessita-se fazer adaptações baseadas no método da tentativa e erro, gasta-se tempo sem a certeza de que o concreto produzido seja, realmente, um concreto econômico e dosado de uma forma que minimize futuras manifestações patológicas, como, por exemplo, a retração.

Segundo Aïtcin (2000, p.243), o objetivo de qualquer método de dosagem é determinar uma combinação adequada e econômica dos constituintes do concreto, que possa ser usada para a primeira mistura experimental com vistas a produzir um concreto que possa estar próximo

daquele que consiga um bom equilíbrio entre as várias propriedades desejadas, ao menor custo possível.

No Brasil, poucos estudos sobre o uso do concreto auto-adensável foram realizados. Uma das razões disso, deve-se ao custo deste tipo de concreto, que pode chegar ao dobro do de concretos convencionais (CC) (AMBROISE *et al.*, 1999, p.556). No entanto, Ambroise *et al.* (1999, p.556) testaram alguns CAA que tiveram um aumento de apenas 20% no custo dos materiais em relação ao CC, e, levando-se em consideração a diminuição do custo com lançamento e adensamento, o valor final provavelmente decairia. Segundo Grauers (1998, p.5), o custo dos materiais do CAA é apenas 10% superior ao dos materiais do concreto convencional, para uma mesma faixa de resistência à compressão. Na Suécia, o CAA foi utilizado em lajes para residências e a produtividade aumentou em 60% (PERSSON, 2001, p.193). Segundo Proske e Graubner (2002, p.2), a racionalização do processo de fabricação, somado ao aumento de produtividade e qualidade do CAA, compensa a elevação do custo unitário dos materiais.

De acordo com Bernabeu (2000, p.28), o uso do CAA é economicamente viável em situações específicas: quando há dificuldade para o adensamento ou vibração do material ou armaduras muito densas. Já em situações corriqueiras, necessita-se de um estudo global, abrangendo todas as variáveis, para a determinação do tipo de concreto mais viável economicamente, o CAA ou o CC. Em muitos casos, a economia proporcionada pelo concreto auto-adensável compensa o custo mais elevado de seus materiais, se comparado aos concretos convencionais. Estudos de caso realizados na França e na Suécia apontaram uma economia de 10% no custo final dos CAA.

Gomes *et al.* (2003b, p.1) afirmam que o desenvolvimento de concretos especiais, especificamente o auto-adensável, que utilizam alta dosagem de resíduos sólidos industriais na forma de finos, é uma contribuição positiva para o desenvolvimento sustentável do concreto. Ao utilizar-se sílica ativa, cinza volante, metacaulim e cinzas de casca de arroz em substituição ao cimento, obtem-se um ganho ecológico significativo, já que estes são resíduos ou subprodutos industriais. Este mesmo autor acrescenta que o CAA normalmente trabalha com relações *a/c* menores, devido ao uso de aditivos superplastificantes, o que torna a estrutura mais durável, retardando-se a necessidade de reparos e substituições. Esta afirmação, no entanto, não é consensual.

Além disso, com a eliminação do processo de adensamento ou compactação mecânica, o ambiente de trabalho pode melhorar bastante, o trabalho braçal fica mais leve e o barulho da vibração é eliminado. O uso do concreto auto-adensável direciona a construção civil para uma produção industrializada, diminuindo o custo da mão-de-obra, aumentando a qualidade, a durabilidade, a confiança na estrutura e aumentando a segurança dos trabalhadores. Grauers (1998, p.5) afirma que quando as especificações técnicas e econômicas do concreto auto-adensável forem alcançadas, é esperado que todos os concretos do futuro sejam auto-adensáveis (1998, p.5). Okamura (1997, p.1) prevê que o desenvolvimento do CAA será necessário para garantir estruturas de concreto duráveis no futuro. Collepari (2001, p.1) afirma que o concreto auto-adensável é considerado atualmente o material cimentício existente mais avançado. O novo produto CAA representa um marco na pesquisa do concreto (PROSKE e GRAUBNER, 2002, p.1); (ZHU *et al.*, 2001, p.57).

1.2 OBJETIVOS DA PESQUISA

Esta pesquisa tem por objetivo o desenvolvimento de um método para a dosagem de concretos auto-adensáveis, baseado no método IPT/EPUSP (HELENE e TERZIAN, 1992, p.225-299) para a dosagem de concretos convencionais, que permita produzir concretos auto-adensáveis a partir de materiais locais, esperando alcançar a resistência à compressão definida, com o menor custo possível.

Como objetivos secundários pretende-se:

- a) comparar o custo global por metro cúbico dos concretos convencionais com os auto-adensáveis, para os mesmos traços aglomerantes:agregados, em massa, '1:m';
- b) comparar o custo global por metro cúbico dos CAA, com 3 tipos de finos, 1 não pozolânico e 2 pozolânicos, para os mesmos traços '1:m';
- c) comparar o custo global por metro cúbico dos CAA com e sem aditivo modificador de viscosidade, para os 3 finos, para os mesmos traços '1:m';

- d) comparar o consumo de cimento em kg/m^3 , para a resistência à compressão de 30 MPa, aos 3, 7, 28 e 63 dias, entre o concreto convencional e os CAA, bem como dos CAA entre si;
- e) comparar o custo dos concretos para as resistências à compressão de 20, 30 e 40 MPa aos 28 e 63 dias;
- f) comparar o custo por MPa dos concretos para os traços 1:3, 1:4,5, 1:6 e 1:7,5, aos 3, 7, 28 e 63 dias.

1.3 DELIMITAÇÕES

Os ensaios práticos foram executados para exemplificar e tornar claro o método de dosagem proposto. Assim foram escolhidos apenas um tipo de cimento, três tipos de materiais finos (dois pozolânicos e outro não), dois tipos de aditivos (superplastificante e modificador de viscosidade) e um tipo de agregado miúdo e outro graúdo.

Como o objetivo desta pesquisa é de dosar um concreto auto-adensável em função de sua resistência à compressão, não foram realizados ensaios de durabilidade e outros testes complementares, como a determinação do módulo de elasticidade ou do coeficiente de Poisson.

1.5 ESTRUTURA DA PESQUISA

No primeiro capítulo é feita uma introdução à pesquisa, destacando-se a importância do tema e, conseqüentemente, a justificativa para o seu desenvolvimento. São descritos os objetivos principal e secundários, além das delimitações e estrutura desta pesquisa.

No capítulo dois, são apresentadas a definição, o histórico, vantagens e a utilização do concreto auto-adensável. Também é apresentado um estudo dos diversos equipamentos para medir a trabalhabilidade do concreto auto-adensável, sendo que muitos destes ainda não foram normalizados, conseqüentemente, não há uma uniformidade nas interpretações dos resultados. Uma busca dos limites de cada um dos equipamentos adotados por diversos

autores, consta nesta parte do trabalho. São analisados os ensaios em sua totalidade e, após, é descrito o procedimento detalhado de cada equipamento individualmente.

Foi realizada uma busca sobre os principais métodos de dosagem existentes para o concreto auto-adensável no quarto capítulo, como o de Okamura (1995), Su *et al.* (2001) e Gomes (2002).

O capítulo cinco apresenta o método de dosagem para concretos auto-adensáveis proposto nesta dissertação. Precedendo este método, é ilustrado o método de dosagem de concretos convencionais IPT/EPUSP, que é a base deste trabalho.

No sexto capítulo são dosados, pelo método proposto, concretos auto-adensáveis com materiais locais de Porto Alegre, sendo analisados os resultados de resistência à compressão aos 3, 7, 28 e 63 dias, bem como a resistência à tração por compressão diametral, aos 28 dias. Também são feitas comparações de custo entre o CAA e o CC. Foram dosadas uma família com concreto convencional referência e outras seis com concreto auto-adensável, uma com fíler calcáreo, outra com metacaulim e a outra com cinza de casca de arroz, como materiais finos, com quatro traços cada. Foram realizadas primeiramente com aditivo modificador de viscosidade e após sem.

E finalmente no capítulo sete, constam as considerações finais, bem como sugestões para futuras pesquisas.

2 CONCRETO AUTO-ADENSÁVEL (CAA)

2.1 DEFINIÇÃO

O termo concreto auto-adensável (CAA) identifica uma categoria de material cimentício que pode ser moldado nas fôrmas e preencher cada espaço exclusivamente através de seu peso próprio, sem necessidade de qualquer forma de compactação ou vibração externa (COPPOLA, 2000, p.42); (ARAÚJO *et al.*, 2003, p.1); (BARBOSA *et al.*, 2002, p.2); (MA e DIETZ, 2002, p.2); (Ho *et al.*, 2002, p.505). A auto-adensabilidade do concreto no estado fresco é descrita como a habilidade de todo o material preencher espaços e envolver as barras de aço e outros obstáculos, através, exclusivamente, da ação da força da gravidade, mantendo uma homogeneidade adequada (BOSILJKOV, 2003, p.1279).

Um concreto só será considerado auto-adensável, se três propriedades forem alcançadas: a fluidez, a coesão necessária para que a mistura escoe intacta entre barras de aço ou habilidade passante, e a resistência à segregação (*European Federation for Specialist Construction Chemicals and Concrete Systems*, 2002, p.7). Noguchi *et al.* (1999, p.1) afirmam, inclusive, que a habilidade do concreto fresco, CAA ou não, passar através de espaços estreitos ou obstáculos é um dos principais fatores que influem na qualidade final do concreto endurecido.

Fluidez é a propriedade que caracteriza a capacidade do concreto auto-adensável de fluir dentro da fôrma e preencher todos os espaços (FURNAS, 2004a). Habilidade passante é a propriedade que caracteriza a capacidade do CAA de escoar pela fôrma, passando por entre as armaduras sem obstrução do fluxo ou segregação (FURNAS, 2004b). E resistência à segregação é a propriedade que caracteriza a capacidade do CAA de se manter coeso ao fluir dentro das fôrmas, passando ou não por obstáculos (EFNARC, 2002, p.5).

2.2 HISTÓRICO

A princípio, o concreto auto-adensável (CAA) não é novo, pois em concretagens submersas já era usado um concretos que não exigiam compactação ou adensamento externo, até porque

era impossível. Mas como estes concretos continham alto teor de pasta de cimento e aditivos plastificantes, certamente apresentavam problemas de retração, calor de hidratação elevado e alto custo (BARTOS, 2000, p.1). Collepardi (2001, p.2) acredita que o CAA já era estudado e utilizado em casos práticos em Hong Kong, Nova Iorque e Trieste (Itália) há 20, 25 anos atrás, porém com outra nomenclatura. Até meados dos anos 70, o ACI (*American Concrete Institute*) não recomendava que se utilizasse misturas com resultados de abatimento (*slump test*) acima de 175mm, já que a exsudação aumentava exponencialmente, como pode-se observar na figura 1. Observa-se, inclusive, que à medida que o consumo de cimento diminui o problema se agrava, pois a quantidade de finos é menor. Mas com o advento dos aditivos superplastificantes, pode-se dosar concretos fluidos com valores de abatimento acima de 250mm com nenhuma ou desprezível exsudação (figura 2). Assim, foi sugerido que se nomeasse de concretos reodinâmicos aquelas misturas bastante fluidas, mas ao mesmo tempo coesivas e com baixa tendência à segregação e exsudação.

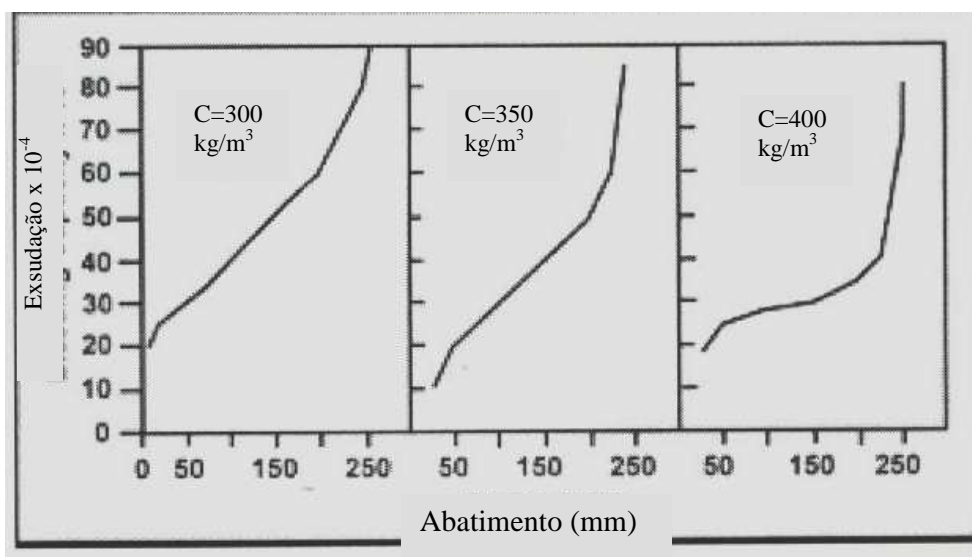


Figura 1: exsudação de concretos sem aditivos (fonte: COLLEPARDI, 2001, p.12)

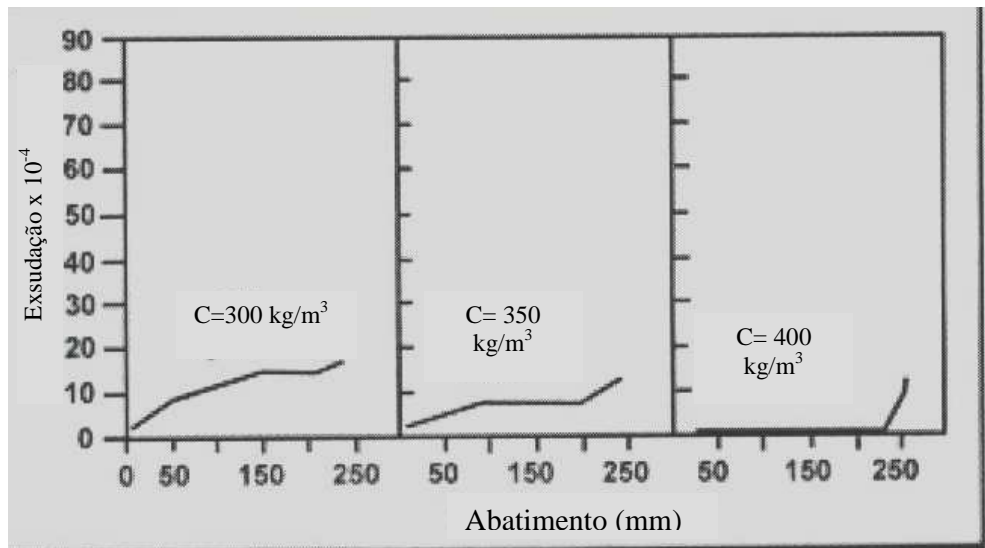


Figura 2: exsudação de concretos com aditivos superplastificantes
(fonte: COLLEPARDI, 2001, p.12)

O princípio mais importante para concretos fluidos e resistentes à segregação, incluindo o CAA, é o uso de aditivos superplastificantes combinados com alto teor de materiais finos, sejam eles cimento Portland, adições minerais, fíler de rochas (calcáreo, basáltico, granítico) e/ou areia fina. Na tabela 1, a mistura A descreve um traço utilizado no fim dos anos 70 em uma doca usando o método *Tremie* de concretagens submersas, onde este foi adensado sem vibração ou compactação externa em um volume de 40.000 m³, enquanto a mistura B foi utilizada na superestrutura desta obra (COLLEPARDI, 2001, p.3).

Observa-se que o abatimento do tronco de cone da mistura B não é extremamente alto, ao contrário do da mistura A, onde, inclusive, 260mm é tão alto que chega a ser intrigante o modo como foi medido, já que este ensaio não tem toda esta precisão.

O moderno concreto auto-adensável foi desenvolvido no Japão para resolver o problema da baixa durabilidade de construções em concreto armado. Por volta de 1983 iniciaram os primeiros estudos, coordenados por Hajime Okamura (1997, p.50). Para a execução de estruturas duráveis, é necessário uma compactação adequada do concreto, a qual é realizada por operários qualificados. Mas, com a modernização da indústria japonesa, foi diminuindo o número de trabalhadores qualificados em toda a indústria e, conseqüentemente, nos canteiros de obras, diminuindo, assim, a qualidade final da compactação das estruturas (OKAMURA,

1997, p.50); (DE LA PEÑA, 2001, p.1); (BARTOS, 2000, p.1); (OUCHI, 1999); (OUCHI e HIBINO, 1999).

Tabela 1: traços utilizados no fim dos anos 70

Componente	Mistura A	Mistura B
Cimento Portland Comum	400 kg/m ³	300 kg/m ³
Cinza Volante	-	90 kg/m ³
Areia Fina (0,075 - 0,60mm)	180 kg/m ³	-
Areia Média (0 – 5mm)	990 kg/m ³	670 kg/m ³
Pedregulho (5 – 15mm)	630 kg/m ³	305 kg/m ³
Pedregulho (10 – 20mm)	-	710 kg/m ³
Água	190 kg/m ³	187 kg/m ³
Superplastificante	7 kg/m ³	4 kg/m ³
Relação água/cimento	0,47	0,62
Relação água/aglomerante	0,47	0,48
Abatimento (Slump)	260 mm	220 mm

(fonte: COLLEPARDI, 2001, p. 11)

Primeiramente, Okamura (1997, p. 50) pensou em adaptar para as estruturas convencionais, os concretos submersos resistentes à lixiviação, que já eram utilizados na época para resolver este problema. É importante frisar que aquele concreto possuía uma excelente resistência à segregação devido ao aditivo modificador de viscosidade, a base de polímeros solúveis em água. Mas este tipo de concreto não satisfaz completamente às expectativas, basicamente por duas razões: a grande viscosidade impedia eliminação de bolhas de ar aprisionadas na massa do concreto e a compactação deste em áreas altamente reforçadas com armaduras era complicada. Assim, os estudos foram direcionados para a trabalhabilidade de concretos.

Através da visualização do concreto em um experimento proposto por Hashimoto (OKAMURA, 1997, p.51), pode-se observar o movimento dos agregados graúdos, com a substituição da argamassa do concreto por um material polímero transparente, na seqüência das figuras 3a a 3d. Observa-se que na figura '3a' os agregados graúdos do concreto estão alcançando o canal estreito, enquanto que na figura '3b', já estão passando por este canal, e o atrito entre as partículas faz com que estas se aglomerem, deixando vazios entre si, não ocupando todo o espaço disponível. Nas figuras '3c' e '3d', a situação se agrava. Este fato

dificulta a fluidez do concreto e pode-se observar o resultado do experimento, que mostrou que o bloqueio da fluidez através de um obstáculo ou passagem estreita ocorreu em função do contato entre os agregados graúdos, e para evitar este problema, foi limitada a quantidade de agregado graúdo, assim como estabeleceu-se que o concreto deveria possuir uma viscosidade moderada (OKAMURA, 1997, p.51).

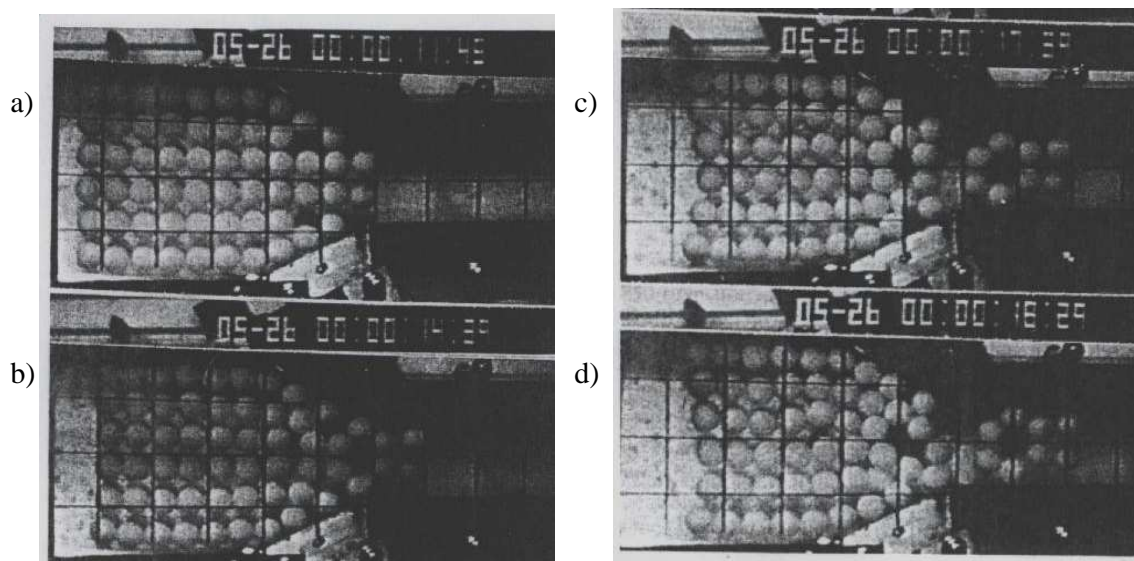


Figura 3: movimento do agregado graúdo (fonte: OKAMURA, 1997, p.51)

Segundo Okamura (1997, p.51), para o concreto fluir uniformemente através de barras de aço, a tensão de cisalhamento da argamassa deve ser pequena. Esta tensão surge na argamassa, devido ao deslocamento das partículas de agregado graúdo. Observando-se resultados experimentais, Okamura concluiu que a tensão de cisalhamento da argamassa dependeria da relação água/aglomerante (a/agl), e que existia uma relação a/agl ótima, para a menor tensão.

Assim, surge um problema: aumentando a relação água/aglomerante, aumenta a fluidez do concreto, mas, ao mesmo tempo, diminui sua viscosidade. Por isso é que para a produção de concretos auto-adensáveis é praticamente obrigatório o uso de aditivos superplastificantes e recomendável o uso de modificadores de viscosidade, o primeiro para aumentar a fluidez e o segundo para aumentar a viscosidade do concreto.

Após um estudo aprofundado de todas estas informações, em 1988, Ozawa desenvolveu o primeiro concreto auto-adensável. Alguns estudos deram segmento a esta nova tecnologia e

em 1993, Okamura, Ozawa e Mackawa publicaram o primeiro livro na área (em japonês) *High Performance Concrete* (OKAMURA e OUCHI, 2003, p.1); (OKAMURA, 1997, p.52); (DE LA PEÑA, 2001, p.1). Hoje, o CAA tem tomado significativo impulso na Europa, tanto na indústria de pré-moldados de concreto como nas construções convencionais (ARAÚJO *et al.*, 2003, p.2). Segundo Bartos (2000, p.1), no início dos anos 90, havia poucas publicações a respeito do CAA, pois as grandes corporações japonesas que estavam desenvolvendo esta nova tecnologia mantinham as pesquisas secretamente, para obterem ganhos comerciais. Inclusive, o CAA era utilizado com outros nomes, como SQC (*Super Quality Concrete*) pela *Maeda Corporation*, NVC (*Non-Vibrated Concrete*) pela *Kajima Corporation*, ou *Biocrete* pela *Taisei Corporation*.

O desenvolvimento do CAA teve um forte impacto nos engenheiros e profissionais especialistas em tecnologia do concreto na época. O novo tipo de concreto desenvolveu-se intensiva e rapidamente até se tornar uma importante tecnologia para as construções (SHINDOH e MATSUOKA, 2003, p.1), sendo rapidamente adotada em muitos países da Europa (BARTOS, 2000, p.5), e no Japão, como percebe-se na figura 4, que ilustra a produção anual de 1990 até 1997 (OUCHI, 1999). Persson (2003, p.373) afirma que o CAA já representava 5% da produção total de concreto da Suécia, em 2003.

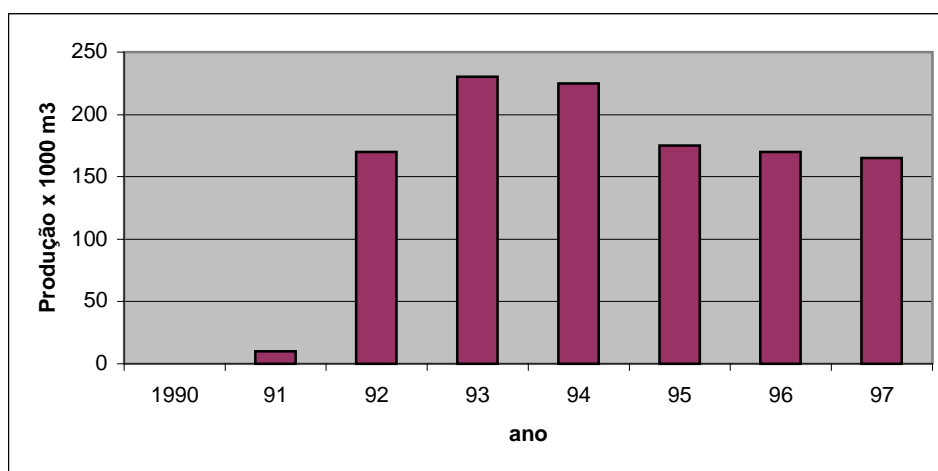


Figura 4: produção anual de CAA no Japão, de 1990 até 1997 (fonte: OUCHI, 1999)

2.3 VANTAGENS

O concreto auto-adensável é descrito como uma grande revolução ocorrida na tecnologia do concreto para a construção nas últimas décadas, já que possibilita vários ganhos, diretos e indiretos, entre os quais (EFNARC, 2002, p.4); (GOMES *et al.*, 2003b, p.6); (COPPOLA, 2000, p.44); (AMBROISE *et al.*, 1999, p.560); (ARAÚJO *et al.*, 2003, p.2); (BARBOSA *et al.*, 2002, p.3); (DE LA PEÑA, 2001, p.1); (BARTOS, 2000, p.1); (BOSILJKOV, 2003, p.1279); (OUCHI, 1999); (CAMPION e JOST, 2000, p.31); (PROSKE e GRAUBNER, 2002, p.2):

- a) acelera a construção;
- b) reduz a mão-de-obra no canteiro;
- c) melhora o acabamento final da superfície;
- d) pode aumentar a durabilidade por ser mais fácil de adensar;
- e) permite grande liberdade de formas e dimensões;
- f) permite concretagens em peças de seções reduzidas;
- g) elimina o barulho de vibração;
- h) torna o local de trabalho mais seguro, em função da diminuição do número de trabalhadores;
- i) pode obter um ganho ecológico;
- j) pode reduzir o custo final do concreto e/ou da estrutura.

O CAA possui uma grande deformabilidade no estado fresco, ou seja, pode ser moldado facilmente nas mais diversas formas, sob a ação da gravidade, e, ainda mais se forças externas forem aplicadas (DE LA PEÑA, 2001, p.1). Isto permite que o CAA percorra até dez metros de distância horizontal, mesmo com obstáculos no caminho (armaduras, eletrodutos e outros) (COPPOLA, 2000, p.42).

Segundo Coppola (2000, p.42), a grande resistência à segregação, aliada à fluidez do CAA, permite a eliminação de macro defeitos, bolhas de ar e falhas de concretagem, responsáveis diretos por perdas de desempenho mecânico do concreto e durabilidade da estrutura, e também é importante frisar que esta tecnologia acelera a edificação, podendo haver um ganho de tempo da ordem de vinte a vinte e cinco por cento.

Bartos e Söderlind (2000, p.15), em estudo experimental realizado, concluíram que o ruído captado por trabalhadores e pelo entorno da edificação, quando utilizado o CAA, é de, aproximadamente, um décimo do ruído recebido quando o concreto convencional é utilizado, em decibéis.

De La Peña (2001, p.1) afirma que, além das vantagens já mencionadas, o concreto auto-adensável permite obter altas resistências à compressão a curto e longo prazo, baixa relação água/cimento, baixa permeabilidade e alta durabilidade. E a possibilidade da eliminação da vibração é muito interessante, uma vez que, além da economia de energia elétrica e mão de obra, a vibração produz ruído, podendo causar doenças nos operários. Somado a isso, a vibração também desgasta e exerce forte pressão nas fôrmas, podendo estas cederem, se não estiverem bem presas.

Também, Bosiljkov (2003, p.1279) afirma que a adição de materiais finos no CAA melhora diversas propriedades, tanto no estado fresco como no endurecido. Esta pesquisadora acredita que os finos atuam como pontos de nucleação, ou seja, quebram a inércia do sistema, fazendo com que as partículas de cimento reajam mais rapidamente com a água, obtendo-se, assim, ganhos de resistência nas primeiras idades. Assim como, aumentando-se o pacote de partículas finas, cresce a compacidade da pasta, dificultando a penetração de agentes externos agressivos e melhorando a zona de transição.

Ao mesmo tempo em que resíduos da construção podem funcionar como finos, dando coesão ao CAA, a viabilidade de sua utilização pode ser uma solução para os problemas gerados em sua disposição. Assim, o cimento, que é um material mais caro, poderá ser usado com a única função de dar resistência ao concreto (BOSILJKOV, 2003, p.1279); (GOMES, 2003b, p.1); (JACOBS e HUNKELER, 2001).

Resultados experimentais mostraram que o CAA apresentou reduções significativas no coeficiente de permeabilidade e absorção capilar, se comparado ao concreto convencional referência, de faixas de resistência similares (ZHU e BARTOS, 2003, p.925). Estes mesmos

autores também concluíram que a penetração de cloretos depende das adições utilizadas, ou seja, CAA e CC de mesmas resistências à compressão, com as mesmas adições, devem ter os mesmos valores de penetração de cloretos. Persson (2003, p.379) concluiu, em um estudo experimental realizado, que o CAA possui uma resistência interna de congelamento superior ao concreto convencional. Em outro estudo experimental, Sonebi *et al.* (2000, p.25) concluíram que o CAA teve uma absorção por capilaridade de cerca da metade do concreto convencional referência, ambos de mesma relação a/agl.

Por todos estes motivos, o concreto auto-adensável tem se tornado uma excelente opção para o setor da construção, e como será visto, vem crescendo rapidamente sua utilização e estudos a respeito deste novo material, apesar de que o assunto ainda não tem sido muito explorado.

2.4 UTILIZAÇÃO DO CAA

O CAA pode ser utilizado tanto moldado *in loco* como na indústria de pré-moldados, pode ser dosado no canteiro de obras ou em centrais de concreto e depois transportado via caminhão betoneira para as construções. Também pode ser lançado com bombas de concreto, guas ou simplesmente espalhado, ou seja, o CAA é tão versátil quanto o concreto convencional.

Há poucas referências a respeito da utilização do concreto auto-adensável em obras de engenharia. E, normalmente, as utilizações são em estruturas especiais, complicadas de se concretar com o concreto convencional. Nesta parte do trabalho, foi feito um levantamento das referências existentes.

O CAA foi utilizado em 19 pontes e em outros projetos na Suécia, onde a durabilidade das estruturas deveria ser superior (PERSSON, 2003, p.373).

Segundo Obras (2000), foi utilizado um concreto estrutural branco de consistência líquida, na obra 'A Sagrada Família', de Barcelona, Espanha. Nesta publicação, não fica claro se este concreto era auto-adensável, mas foram usados sílica ativa, que torna a mistura coesa, e aditivos superplastificantes, que fluidificam o material. Sabe-se que uma estrutura de concreto branco aparente não pode, em hipótese alguma, apresentar falhas de concretagem, pois correções futuras ficam visíveis, prejudicando a estética do local.

Na França também foi usado o CAA, na *Chamarande*, em 1998 (SÖDERLIND e CLAESON, 2000, p.5); (BERNABEU e LABORDE, 2000, p.7). As peças concretadas eram longas paredes, com 2,30 metros de altura, 0,16 metros de espessura e 30 metros de comprimento e colunas altamente reforçadas. O traço do concreto está na tabela 2. Observa-se o teor de argamassa de 61,50%, que pode elevar o custo do concreto e aumentar as possibilidades de ocorrência de manifestações patológicas. Também o traço aglomerantes:agregados está em 1:2,9, ou seja, este é um concreto rico, o que ajuda, novamente, a elevar os problemas já citados.

Tabela 2 : traço do CAA utilizado em *Chamarande*, França

Cimento	310 kg/m ³
Cinza volante	190 kg/m ³
Agregado 4/10 mm	750 kg/m ³
Areia 0/4 mm	550 kg/m ³
Areia fina	150 kg/m ³
Superplastificante Glenium 27 (MBT)	1,30% (em relação à massa dos aglomerantes)
Modificador de viscosidade Meyco MS686	1,50% (em relação à massa dos aglomerantes)
Água	200 a 210 l/m ³

(Fonte: SÖDERLIND e CLAESON, 2000, p.5); (BERNABEU e LABORDE, 2000, p.10)

A obra de *Bretonneau*, na França, é um teste que está sendo feito com o CAA, para melhorá-lo e desenvolvê-lo, desde 1999 (SÖDERLIND e CLAESON, 2000, p.6). O traço usado no preenchimento de diversos tipos de colunas é expresso na tabela 3. Observa-se o teor de argamassa de 61,50%, que pode elevar o custo do concreto e aumentar as possibilidades de ocorrência de manifestações patológicas, e o alto teor de aditivo superplastificante de 3^o geração, 1,27% da massa do cimento, que aumenta o custo e o ar incorporado do concreto.

Tabela 3: traço do CAA utilizado em *Bretonneau*, França

Cimento	300 kg/m ³
Pedrisco 4/12 mm	713 kg/m ³
Areia 0/4 mm	840 kg/m ³
Superplastificante Glenium 51	3,80 kg/m ³
Incorporador de ar	0,67 kg/m ³
Água	198 l/m ³

(Fonte: SÖDERLIND e CLAESON, 2000, p.6)

O CAA também foi utilizado em *Norrköping*, Suécia, no ano de 1998, em um edifício comercial (SÖDERLIND e CLAESON, 2000, p.9). O edifício possuía sete andares, onde, nos cinco superiores, foram utilizados pré-moldados e os dois inferiores foram totalmente concretados com CAA, com e sem fibras de aço, totalizando cerca de 3000 m³. O traço deste concreto está na tabela 4, onde observa-se que o teor de argamassa parece alto, em 68,4%, o que aumenta a demanda de água.

Tabela 4 : traço do CAA utilizado em *Norrköping*, Suécia

Cimento	330 kg/m ³
Fíler calcáreo	125 kg/m ³
Água	182 kg/m ³
Agregado 0/8 mm	1029 kg/m ³
Agregado 8/16 mm	686 kg/m ³
Superplastificante Viscocrete 2 (Sika)	1,7-1,8% (massa do cimento)
Fibras de aço	0, 10, 30

(Fonte: SÖDERLIND e CLAESON, 2000, p.9)

O CAA também foi utilizado com sucesso em um edifício comercial em *Slona*, Suécia, no programa *Startboxen* (SÖDERLIND e CLAESON, 2000, p.10). O volume total concretado foi de, aproximadamente, 2200 m³, em 1999. O teste incluiu os seguintes elementos:

- a) Seis paredes com e sem fibras de aço, de 2,70 a 3,40 metros de altura e 25 a 30 centímetros de largura;
- b) Duas lajes sem revestimento de 30 a 40 centímetros de espessura;
- c) Uma laje com revestimento de pedra ou lâminas de madeira, com 35 centímetros de espessura;
- d) Dois pilares;
- e) Duas lajes de 8 centímetros, concretadas com concreto referência.

Para a concretagem do túnel enclausurado *Oresund*, foi utilizado o CAA, até porque seria impossível que se vibrasse o concreto, devido às condições locais (BERNABEU e

LABORDE, 2000, p.4-5). A obra foi realizada em 1999, e foram utilizados cerca de 80 m³ de CAA. O túnel possuía 40 metros de comprimento, com as seções de 1 x 1 metro, e o traço utilizado está apresentado na tabela 5. Observa-se que a relação aglomerante:agregados está em 1:3,53. Já a relação a/agl está em 0,28, que, somada à presença da sílica ativa, provavelmente aumente a resistência à compressão do concreto, bem como sua durabilidade. O teor de argamassa está em 55,5%.

Tabela 5 : traço do CAA utilizado no túnel *Oresund*

Cimento	380 kg/m ³
Cinza volante	70 kg/m ³
Sílica ativa	45 kg/m ³
Agregado Miúdo 0/2 mm	750 kg/m ³
Agregado graúdo 2/8 mm	290 kg/m ³
Agregado graúdo 8/16 mm	710 kg/m ³
Água	143 l/m ³
Superplastificante rheobuild 2000B	14 kg/m ³
Modificador de viscosidade <i>Welan Gum</i>	0,150 l/m ³

(Fonte: BERNABEU e LABORDE, 2000, p.7)

Em 1999, foi executada uma estrutura em forma de ‘iglu’, como mostra a figura 5. Esta edificação possui cinco metros de altura, 11,70 metros de largura e 22 metros de comprimento, e, devido à dificuldade de vibração imposta pelas suas formas, foi decidido utilizar o CAA (BERNABEU e LABORDE, 2000, p.12). A concretagem foi executada em duas partes e o volume total foi de, aproximadamente, 200 m³. O traço utilizado está apresentado na tabela 6. Observa-se que o teor de argamassa parece estar elevado, em 62%.

Tabela 6: traço do CAA utilizado na estrutura em ‘iglu’

Cimento	380 kg/m ³
Cinza volante	110 kg/m ³
Areia 0/4 mm	601 kg/m ³
Areia calcárea 0/3 mm	260 kg/m ³
Agregado calcáreo 4/16 mm	820 kg/m ³
Superplastificante Glenium 27 (MBT)	1,50% (massa do aglomerante)
Água	210 kg/m ³

(Fonte: BERNABEU e LABORDE, 2000, p.13)



Figura 5: estrutura em forma de 'iglu', concretada com CAA (fonte: BERNABEU e LABORDE, 2000, p.11)

O CAA também foi utilizado na auto-estrada A46 em *Lyon*, na França, em 2000 (BERNABEU e LABORDE, 2000, p.13). Como os tubos coletores de água de 150 centímetros de diâmetro estavam deformando, foi executado um novo tubo coletor de água em concreto auto-adensável, de 110 centímetros de diâmetro, interno ao tubo antigo. Um total de 120 m³ de CAA foram utilizados. Observa-se, na tabela 7, que ilustra o traço do CAA utilizado, que a relação aglomerantes:agregados parece estar baixa, em 1:3,26 e o teor de argamassa provavelmente esteja elevado, em 69,4%, o que pode causar aumento de custo e a possibilidade de ocorrência de futuras manifestações patológicas.

Tabela 7: traço do CAA utilizado na auto-estrada de *Lyon*, França

Cimento	410 kg/m ³
Cinza volante	80 kg/m ³
Areia 0/5 mm	960 kg/m ³
Pedrisco 5/10 mm	640 kg/m ³
Água	200 kg/m ³
Superplastificante Glenium 27 (MBT)	3 kg/m ³

(Fonte: BERNABEU e LABORDE, 2000, p.15)

Outra auto-estrada onde o CAA foi utilizado, foi a A85, no trecho de uma ponte, em *Vierzon*, na França, em 2000 (BERNABEU e LABORDE, 2000, p.16). Foram concretadas duas vigas ‘H’, com 38,50 metros de comprimento, 80 centímetros de altura e 30 centímetros de largura, totalizando cerca de 20 m³, as duas. O traço está demonstrado na tabela 8. Observa-se, novamente, que o teor de argamassa provavelmente esteja elevado, em 65%, assim como a relação entre aglomerantes:agregados pode estar baixa, em 1:2,83.

Tabela 8: traço do CAA utilizado na ponte da auto-estrada de *Vierzon*, França

Cimento	480 kg/m ³
Sílica ativa	40 kg/m ³
Areia 0/3 mm	770 kg/m ³
Pedrisco 3/6 mm	700 kg/m ³
Água	234 kg/m ³
Superplastificante Optima 100 (CHRYSO)	2,80% (da massa dos aglomerantes)

(Fonte: BERNABEU e LABORDE, 2000, p.19)

Na construção da ponte de *Motala*, na Suécia, também foi utilizado o CAA (BERNABEU e LABORDE, 2000, p.19). Esta obra foi em 1999 e foram gastos cerca de 90 m³, para um vão de 23 metros. O traço usado está na tabela 9.

Tabela 9: traço do CAA utilizado na ponte de Motala, Suécia

Cimento	420 kg/m ³
Fíler calcáreo	160 kg/m ³
Agregado miúdo 0/8 mm	57%
Agregado graúdo 8/16 mm	43%
Superplastificante <i>Glenium 51</i> (MBT)	0,8%
Relação água/cimento	0,38-0,40
Incorporador de ar	-

(Fonte: BERNABEU e LABORDE, 2000, p.21)

Outra ponte executada com o concreto auto-adensável foi a *Arboga* U955, na Suécia (BERNABEU e LABORDE, 2000, p.21). Esta ponte de travessia de pedestres e bicicletas, consumiu cerca de 52 m³ de CAA. O traço está representado na tabela 10.

Tabela 10: traço do CAA utilizado na ponte de *Arboga*, Suécia

Cimento	400 kg/m ³
Fíler 500	170 kg/m ³
Agregado miúdo 0/8 mm	865 kg/m ³
Agregado graúdo 8/18 mm	678 kg/m ³
Água	150 l/m ³
Superplastificante <i>Glenium 51</i>	0,53%
Incorporador de ar	0,05%

(Fonte: BERNABEU e LABORDE, 2000, p.22)

Segundo Söderlind e Claeson (2000, p.7 e 11), também foram feitos uma série de protótipos para a análise do comportamento do CAA em diversas situações, como o teste em Buñol, Espanha, na universidade de Paisley, em Solna, Suécia, e em Billeberga, também Suécia.

Um típico exemplo de aplicação do CAA (OUCHI, 1999); (OKAMURA, 1997, p.53), são as duas ancoragens da ponte suspensa Akashi-Kaikyo, aberta em Abril de 1998. Esta ponte tinha, na época, o maior vão do mundo (1991 metros), e foram lançadas 290.000 m³ de CAA. O concreto foi misturado em um local perto da construção e bombeado por tubos por 200 metros de comprimento, até o local da aplicação. A utilização do CAA proporcionou uma

economia de tempo da ordem de 20%, executando a obra em 2 anos, ao invés dos 2,5 anos previstos.

Segundo Ouchi (1999) e OKAMURA (1997, p.53), o CAA também foi utilizado nas paredes de um tanque LNG pertencente a *Osaka Gas Company*, as quais consumiram 12000 m³ de CAA e foram entregues em 1998. A utilização do CAA permitiu:

- a) Diminuir o número de etapas de 14 para 10, pois pode-se aumentar a altura das paredes;
- b) Reduzir o número de trabalhadores de 150 para 50;
- c) Diminuir o tempo de construção da estrutura de 22 para 18 meses.

Campion e Jost (2000, p.32) relatam a utilização do CAA na reparação da ponte de *Rempenbruecke*, na Suíça. Esta ponte foi construída no início dos anos 60, mas sofreu uma séria deterioração devido à corrosão das armaduras, induzida pela penetração de cloretos no concreto. Então, foram reparados os problemas nas barras de aço. Mas para reforçar a estrutura como um todo, foi criada uma nova viga, a qual era densamente armada e de difícil acesso. A solução encontrada para aplicar o concreto, foi a utilização do CAA, com resistência à compressão de 40 MPa.

Segundo Campion e Jost (2000, p.33), o CAA também foi utilizado na praça *Meinhard*, em Zurique. O CAA usado possuía 35 MPa de resistência à compressão e foi dosado a poucos metros do local de aplicação.

Mas deve-se ter cuidado quando da utilização do CAA, já que a utilização de materiais finos torna sua matriz menos permeável que a do concreto convencional, aumentando assim o risco do *spalling*, quando exposto ao fogo (VANWALLEGHEM *et al.*, 2003, p.855). Boström (2003, p.863) sugere a utilização de fibras de polipropileno, para reduzir este risco ao nível do existente para concretos convencionais.

Observa-se, que a utilização do CAA, na Europa e Japão, ainda é pequena, mas vem aumentando, assim como o interesse de profissionais da área neste material. No Brasil, não se tem casos de utilização do CAA descritos na bibliografia, mas certamente esta tecnologia será melhor aproveitada ao ser melhor difundida.

2.5 TRABALHABILIDADE DO CAA

2.5.1 Considerações iniciais

O conjunto de equipamentos para a avaliação da trabalhabilidade do concreto auto-adensável, que será apresentado neste capítulo, foi totalmente desenvolvido para este novo tipo de concreto. É importante salientar que estes ensaios ainda não foram normalizados e como qualquer procedimento sem normalização, há muitas divergências no meio técnico quanto às especificações e medidas, logo, o mesmo aparelho pode apresentar pequenas diferenças entre uma publicação e outra. Mas um fato interessante é que não há muita variação dos tipos dos aparelhos, ou seja, a grande maioria dos autores utiliza os mesmos testes, porém com medidas e intervalos diferentes, como será mostrado na descrição de cada aparelho.

As três propriedades que são necessárias de medir no CAA são a fluidez, a capacidade deste fluir coeso e íntegro entre obstáculos e a resistência à segregação. Para cada um destes pontos, há um grupo de equipamentos, uns mais aptos que outros e uns mais práticos que outros, conforme pode ser observado na tabela 11.

Tabela 11: aptidões e praticidade dos ensaios para a medição da trabalhabilidade do CAA

Ensaio	Utilização		Propriedades Avaliadas		
	Laboratório	Canteiro	Fluidez	Habilidade Pas.	Coesão
<i>Slump flow</i>	X	X	XXX	N	X
<i>Slump flow T 50</i>	X	X	XXX	N	X
<i>V-Funnel</i>	X	X	XX	N	X
<i>V-Funnel 5 min</i>	X	X	X	N	XXX
<i>L-Box</i>	X	N	N	XXX	XX
<i>U-Box</i>	X	N	N	XXX	XX
<i>Fill-Box</i>	X	N	N	XX	XX
<i>U-Pipe</i>	X	N	X	N	XXX
<i>Orimet</i>	X	X	XX	X	X
<i>J-Ring</i>	X	X	N	XX	XX

XXX – altamente recomendável; XX – recomendável; X – pouco recomendável; N – não relevante

(Fonte: PETERSSSEN, 1999, p. 3, adaptado)

EFNARC (2002, p.21) enumera alguns pontos que devem ser levados em consideração ao avaliar a trabalhabilidade do concreto auto-adensável:

- a) uma das principais dificuldades de utilizar tais testes é que eles têm de medir as três propriedades requeridas no CAA, e nenhum teste é capaz de medir isolado todos os três itens;
- b) ainda não há uma relação clara entre os resultados experimentais e o canteiro de obras;
- c) há pouca precisão de dados, portanto não há uma direção clara na obediência dos limites;
- d) os testes e limites são previstos para concretos com agregado graúdo de diâmetro máximo de 20mm, se for necessário diâmetro maior os equipamentos devem ser ajustados;
- e) não se considera em que tipos de elementos o concreto será adensado, se é em estruturas horizontais ou verticais;
- f) da mesma forma, os equipamentos devem ser ajustados se as armaduras forem muito densas.

Muitos destes pontos são discutíveis ou podem ser solucionados. Conforme já foi visto, realmente apenas um aparelho não consegue medir todas as propriedades necessárias, mas como as dimensões dos equipamentos não são grandes, pode-se perfeitamente realizar dois ou três testes. Quanto ao problema do diâmetro máximo do agregado graúdo ou da densidade das armaduras, sabe-se que este concreto deve passar em armaduras em grande quantidade e que o tamanho máximo do agregado já está limitado em relação ao espaçamento entre barras de aço, logo, é improvável que seja necessário especificar diâmetros maiores que 20mm. A equivalência entre ensaios e canteiro de obras, como todo novo material, só será adquirida com a experiência acumulada com o uso, e por fim, as medidas só serão definitivas, quando estes equipamentos forem normalizados.

2.5.2 *Slump flow test*

2.5.2.1 Introdução

A descrição deste método é baseada em EFNARC (2002, p.21 e 22), Peterssen (1998, p.40), FURNAS (2004a, p.1-6), Tviksta (2000, p.12) e Gomes (2002, p.8 e 9). O *slump flow test* é utilizado para medir a capacidade do concreto auto-adensável de fluir livremente sem segregar. Foi desenvolvido primeiramente no Japão, para ser usado em concretos submersos. A medida de fluidez a ser obtida do CAA é o diâmetro do círculo formado pelo concreto. Para concretos convencionais, a trabalhabilidade é medida pela **NBR NM 67** (Associação Brasileira de Normas Técnicas, 1998b): concreto – Determinação da consistência pelo abatimento do tronco de cone – método de ensaio, ou pela **NBR NM 68** (ABNT, 1998c): concreto – Determinação da consistência pelo espalhamento na mesa de *Graff*. A determinação da consistência do concreto, pelo espalhamento da mesa de *Graff*, é aplicável para misturas que atinjam o espalhamento mínimo de 350 milímetros, mas limitado ao tamanho da mesa, de 700 milímetros. Pode-se afirmar, a grosso modo, que o *slump flow test* é uma adaptação destes dois ensaios, para um concreto excessivamente fluido.

O *slump flow test* também permite observar, visualmente, se o concreto está segregando ou não. As figuras 6, 7 e 8 ilustram o resultado do ensaio realizado com três CAA, o primeiro sem apresentar segregação, o segundo tendendo a segregar e o terceiro com segregação visível. Nota-se que à medida que o concreto vai segregando, o agregado graúdo vai formando uma pilha central, enquanto ar vai sendo incorporado e apenas a argamassa vai fluindo para as extremidades, formando uma auréola. Se este concreto da figura 8 fosse aplicado em estruturas reais, certamente o agregado graúdo iria para o fundo das fôrmas, e a argamassa e a água subiriam para a superfície, o que provocaria grandes falhas de concretagem, diminuindo a durabilidade e a resistência mecânica das peças.



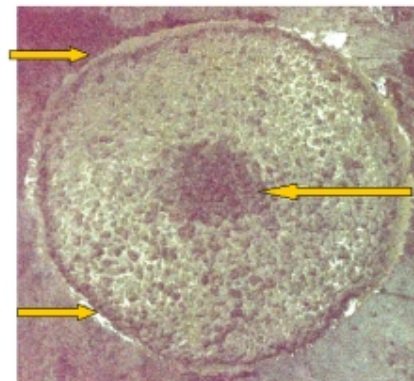
Figura 6: CAA sem segregação (MBT, 2004)

Ligeira
Exsudação



Figura 7: CAA tendendo a segregar (MBT, 2004)

Auréola de
Argamassa



Pilha de
Agregado/
Segregação
Visível

Exsudação
Perceptível

Figura 8: CAA segregado (MBT, 2004)

2.5.2.2 Execução do ensaio

O *slump flow test* pode ser executado por uma pessoa e exige poucos materiais, o que o habilita a ser usado em canteiros de obra, e não somente em laboratórios. É composto por uma base, a qual deve ser um quadrado de 1000 X 1000 milímetros, que não absorva água e nem provoque atrito com o concreto, e por um tronco de cone com materiais de mesmas características da base. Sobre o centro da base deve-se marcar um círculo de diâmetro de 200 milímetros, para a colocação do cone. Este deve ter 300mm de altura, diâmetro interno menor de 100mm e diâmetro maior de 200mm. Também é necessário para a execução do teste uma espátula, uma concha côncava e uma trena para medir o espalhamento do concreto.

Primeiramente deve-se umedecer a placa e o tronco de cone para que estes não absorvam água do concreto durante o ensaio. Após, colocar a placa sobre um chão firme e nivelado, e o tronco de cone no centro da base, segurando-o firmemente sobre o círculo de 200 mm. Aproximadamente seis litros de concreto serão necessários para o ensaio e esta amostra deve ser coletada de acordo com a **NBR NM 33** (ABNT, 1998a): concreto – Amostragem de concreto fresco. Com a concha côncava, preencher de concreto, e com a espátula remover excesso do topo do cone. O adensamento deve ser feito pela força da gravidade, não devendo ser realizado qualquer tipo de compactação. Remover também qualquer excesso de concreto na placa e então, erguer verticalmente o cone e permitir que o concreto flua livremente. Medir o diâmetro do espalhamento em duas direções perpendiculares. A média destas medidas é o valor do *slump flow*. Durante o ensaio é importante a observação da ocorrência ou não de segregação.

Na tabela 12, estão mostrados os limites mínimo e máximo para um concreto ser considerado auto-adensável, segundo diversos autores. Observa-se que estes valores variam consideravelmente. Espalhamentos abaixo do limite inferior, indicam que o concreto está pouco fluido, ou seja, é necessário fluidificar o material através de água ou aditivos superplastificantes, e se a medida estiver acima do limite superior, deve-se tornar o concreto mais coeso, já que este está muito fluido e, provavelmente, segregando.

Tabela 12: limites de resultados para o *slump flow test*, segundo diversas referências

REFERÊNCIAS	ESPALHAMENTO (mm)	
	MÍNIMO	MÁXIMO
EFNARC (2002)	650	800
Gomes (2002)	600	700
Gomes <i>et al.</i> (2003a)	600	750
Araujo <i>et al.</i> (2003)	650	800
Rigueira Victor <i>et al.</i> (2003)	600	800
Barbosa <i>et al.</i> (2002)	550	700
Peterssen (1999)	650	725
Tviksta (2000)	600	-
Coppola (2000)	600	750
Palma (2001)	650	750

2.5.3 Slump flow $T_{50\text{ cm}}$ test

O *slump flow* $T_{50\text{ cm}}$ test é uma variação do *slump flow*, e a sua descrição foi baseada em EFNARC (2002, p.21 e 22), FURNAS (2004a, p.1-6), Tviksta (2000, p.12) e Gomes (2002, p.8 e 9). O procedimento e os equipamentos são os mesmos, as únicas alterações são a marcação de um círculo de 500 mm de diâmetro centrado na base, a necessidade de um cronômetro para a realização do teste e a presença de pelo menos duas pessoas.

O teste é realizado simultaneamente com o *slump flow test*. Assim que o cone for erguido verticalmente, o segundo operador deve acionar o cronômetro e marcar o tempo em que o concreto alcança a marca dos 500 mm. Diversos autores estabeleceram limites para o concreto neste ensaio, como mostra a tabela 13. Se o tempo abaixo do limite inferior, indica que o concreto está muito fluido, e se o tempo for acima do limite superior, indica que o concreto está muito coeso, devendo, em ambos os casos, ser corrigido. A figura 9 representa um teste do *slump flow test* com o *slum flow* $T_{50\text{ cm}}$ test.

Observa-se pela figura 9 que não há segregação visível, uma vez que o agregado graúdo está acompanhando a argamassa até as extremidades do círculo, não ficando agrupado no centro, e porque a mistura está fluindo uniformemente pela placa de base, formando aproximadamente um círculo e não uma forma irregular. Também não está ocorrendo o desprendimento de pasta, outra indicação de que o concreto está coeso.

Tabela 13: limites de resultados para o *slump flow test* $T_{50\text{ cm}}$, segundo diversas referências

REFERÊNCIAS	TEMPO (s)	
	MÍNIMO	MÁXIMO
EFNARC (2002)	2	5
Gomes (2002)	4	10
Gomes <i>et al.</i> (2003a)	3	7
Araujo <i>et al.</i> (2003)	2	5
Rigueira Victor <i>et al.</i> (2003)	3	6
Peterssen (1999)	3	7
Tviksta (2000)	3	7
Coppola (2000)	5	12
Palma (2001)	3	6



Figura 9: ensaios de *slump flow test* com o *slum flow T_{50cm} test*

2.5.4 *V funnel test*

2.5.4.1 Introdução

O detalhamento deste ensaio foi fundamentado nos procedimentos de EFNARC (2002, p.25 e 26), Peterssen (1998, p.41), FURNAS (2004c, p.1-7) e Gomes (2002, p.10). Desenvolvido no Japão por Ozawa, este equipamento mede a fluidez do concreto, assim como o *slump flow test* e o *slump flow T_{50cm} test* para agregados graúdos de diâmetro máximo de 20mm. A figura 10, adaptada de GOMES (2002), mostra duas possibilidades do aparelho, enquanto a figura 11 ilustra o equipamento utilizado no trabalho experimental. Na extremidade inferior do equipamento retangular existe uma porta, que pode ser deslizante ou com dobradiça, para que

mantenha o concreto no interior do aparelho e seja aberta para iniciar o ensaio. A medida é o tempo em que o material leva para escoar do funil. Após a execução do ensaio, pode-se preencher novamente o funil com concreto e esperar 5 minutos para a repetição do procedimento, para que se teste a resistência à segregação, já que se o CAA estiver segregando, o tempo de escoamento irá aumentar significativamente. Um cuidado que deve ter com este aparelho, é que ele é bastante simples e ainda não sabe se há alguma influência provocada pelo ângulo interno e as paredes internas na fluidez do concreto.

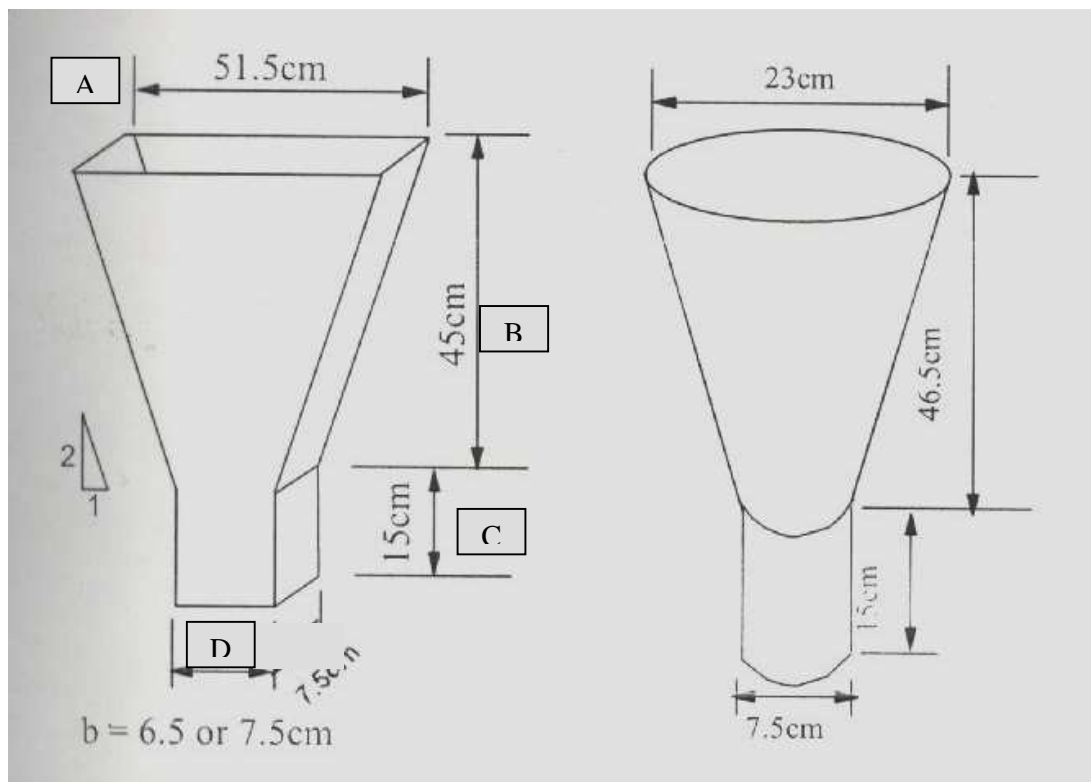


Figura 10: V-Funnels (fonte: GOMES, 2002, p.10, adaptado)

2.5.4.2 Execução do ensaio

Para a realização deste ensaio são necessários um funil, uma espátula, uma concha côncava e um cronômetro. Como é preciso acionar o cronômetro no exato momento em que a porta do aparelho for aberta, são necessários dois operadores, assim como uma base para deixar o equipamento suspenso.



Figura 11: *V-Funnel* sendo utilizado

Como nos outros ensaios, o equipamento deve ser firmemente fixado e nivelado, de forma que não se movimente ao longo da execução do ensaio. Inicialmente deve-se umedecer todo o equipamento, para que a água do concreto não seja absorvida indevidamente. Com a concha côncava, encher o funil com concreto coletado de acordo com a **NBR NM 33** (ABNT, 1998a), novamente sem compactação ou vibração de espécie alguma, e, com a espátula, nivelar o topo do aparelho e retirar o excesso de concreto. Abrir a porta inferior do funil, permitindo que o material escoe unicamente sob a ação da gravidade. O tempo que o concreto leva para esvaziar completamente o funil é o resultado deste ensaio. Para um concreto ser considerado auto-adensável, o tempo de escoamento deve se situar em um intervalo apropriado, e na tabela 14, estão indicados alguns valores propostos por diversos pesquisadores. Quando da repetição do ensaio, é aconselhável que o tempo em que o concreto escoe aumente em, no máximo, três segundos.

Tabela 14: limites de resultados e dimensões para o *v-funnel test*,
segundo diversas referências

REFERÊNCIAS	TEMPO (s)		DIMENSÕES (mm)			
	MÍNIMO	MÁXIMO	A	B	C	D
EFNARC (2002)	6	12	490	425	150	65
FURNAS (2004c)	-	-	515	450	150	65
Gomes (2002)	10	15	515	450	150	65 ou 75
Gomes <i>et al.</i> (2003a)	7	13	515	450	150	65
Araújo <i>et al.</i> (2003)	6	12	-	-	-	-
Noor e Uomoto (1999)	9,5	9,5	490	425	150	70
Peterssen (1998 e 1999)	5	15	550	450	120	75
Coppola (2000)	-	-	500	425	150	65

2.5.5 *L-box test*

2.5.5.1 Introdução

O ensaio do *l-box* mede a fluidez do concreto simultaneamente com a habilidade deste de passar por obstáculos, permanecendo coeso. É descrito por EFNARC (2002, p.26 e 27), FURNAS (2004d, p.1-7), Tviksta (2000, p.15) e Gomes (2002, p.11 e 12). O equipamento consiste em uma caixa em forma de 'L', com uma porta móvel separando a parte vertical da horizontal e, junto a esta divisória, barras de aço que simulam a armadura real da estrutura, criando um obstáculo à passagem do concreto. É importante salientar que o espaçamento e a bitola das barras de aço, no ensaio, dependem, basicamente, das condições reais da estrutura em que o concreto será aplicado. Embora muitos autores defendam uma normalização deste procedimento, o mais correto seria padronizar apenas a parte fixa do equipamento, enquanto as armaduras seriam escolhidas para cada situação. A figura 12 ilustra as medidas do *l-box* com 3 barras de aço de 12,5 mm de diâmetro, espaçadas em 40,6 mm entre si, por serem as mais usuais, como pode-se observar na tabela 15, que ilustra limites defendidos por diversos autores. Aconselha-se utilizar agregados graúdos com diâmetro máximo de 12,50 mm, um terço do valor do espaçamento das armaduras.

2.5.5.2 Execução do ensaio

Para a execução deste ensaio são necessários, além da caixa em 'L' feita com material não absorvente e sem atrito, uma espátula, uma pá côncava, uma trena e, se desejado, um cronômetro para a medição do tempo em que o concreto chega aos 20 centímetros e aos 40 cm, que devem ser marcados no aparelho. A cronometragem destes tempos não é obrigatória nem recomendada por todos os autores, pois estes tempos são pequenos e de difícil marcação, a não ser que se utilize uma pessoa para marcar cada um dos tempos, o que dificulta o ensaio. Devido as suas dimensões e características, é recomendado seu uso apenas em laboratório, sendo de difícil utilização em campo. São necessários cerca de 12 litros de concreto para preencher a parte vertical do equipamento, o qual deve ser amostrado de acordo com os critérios da **NBR NM 33 (ABNT, 1998a)**. Deve-se fixar o *l-box* em solo firme e nivelado, umedecer as paredes do equipamento e testar o portão móvel, para ter certeza que este se erguerá mesmo com a pressão do concreto. Preencher a parte vertical e deixar o material se acomodar por 1 minuto. Após levantar o portão e cronometrar o tempo em que o concreto alcança a marca de 20 e 40 cm. A figura 12 ilustra o ensaio do *l-box* em andamento.

Medir as alturas inicial (H1) e final (H2), indicadas na figura 12, onde $H2/H1$ é o valor procurado, que deve se situar entre 0,80 e 1,00, valor adotado pela maioria dos pesquisadores, como indicado na tabela 15. Quanto mais fluida estiver a mistura, mais rápido chegará nas marcas de 20 e 40 cm e mais nivelada terminará. Também deve-se observar a movimentação do concreto durante o ensaio, pois se este estiver segregando ao passar nos obstáculos, o agregado graúdo irá demorar mais a fluir, enquanto a argamassa do concreto irá chegar primeiro ao final da caixa.

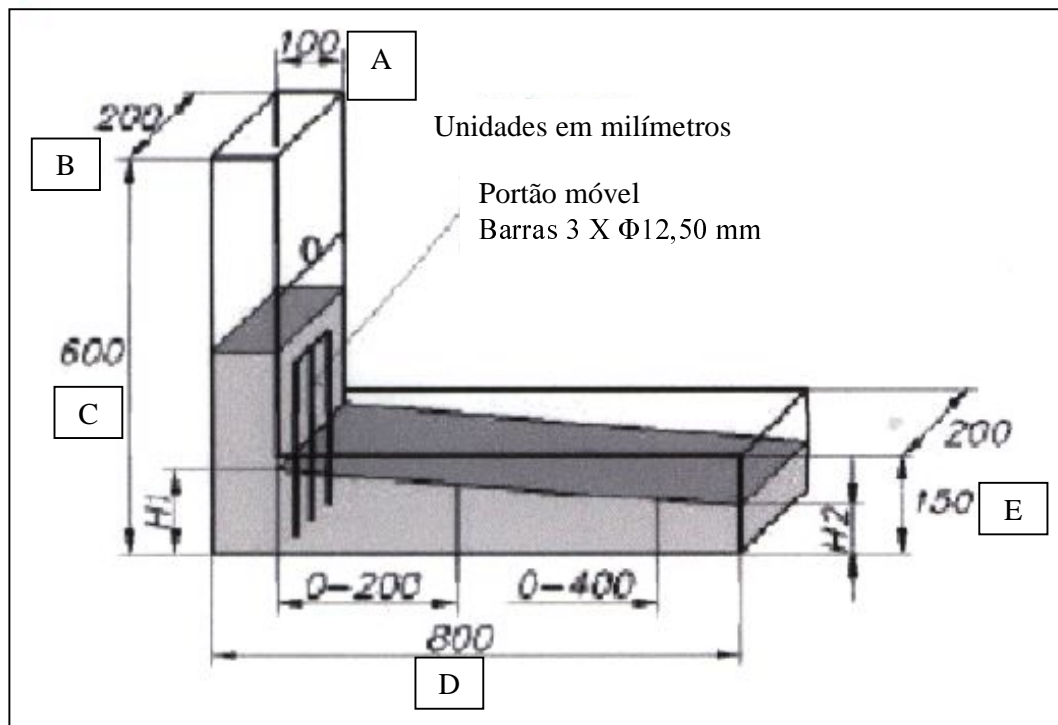


Figura 12: medidas do *l-box* recomendadas (fonte: EFNARC, 2002, p.27)

Tabela 15: limites de resultados e dimensões para o *l-box test*,
segundo diversas referências

REFERÊNCIA	MEDIDAS			DIMENSÕES (mm)				
	H2/H1	T ₂₀ (s)	T ₄₀ (s)	A	B	C	D	E
EFNARC (2002)	0,80	-	-	100	200	600	800	150
FURNAS (2004d)	-	-	-	100	200	600	700	150
Gomes (2002)	0,80	<1	<2	100	200	600	700	150
Gomes <i>et al.</i> (2003a)	0,80	0,5-1,5	2-3	100	200	600	700	150
Araújo <i>et al.</i> (2003)	0,80	-	-	-	-	-	-	-
Rigueira Victor <i>et al.</i> (2003)	0,80	<1,50	<3,50	-	-	-	-	-
Peterssen (1998 e 1999)	0,80	-	-	100	200	600	700	150
Barbosa <i>et al.</i> (2002)	-	-	-	100	-	600	700	150
Tviksta (2000)	0,85	-	-	100	200	600	-	150
Coppola (2000)	0,90	-	-	120	300	600	780	200
Palma (2001)	0,80	-	3 a 6	-	-	-	-	-



Figura 13: ensaio do *l*-box em andamento

2.5.6 *U*-box test

2.5.6.1 Introdução

Este ensaio é utilizado por EFNARC (2002, p.27 e 28), FURNAS (2004f, p.1-7) e Gomes (2002, p.11). Desenvolvido pela *Technology Research Centre of the Taisei Corporation in Japan*, o *u*-box também pode ser chamado de *box shaped test* e serve para medir a fluidez e a habilidade do concreto passar por obstáculos sem segregar. O equipamento ilustrado na figura 14 exibe dois compartimentos separados por um portão móvel e barras de aço de diâmetro de 12,5 mm espaçadas entre si em 40,6 mm. Também podem ser utilizadas as medidas e intervalos propostos por outros pesquisadores, ilustrados na tabela 16.

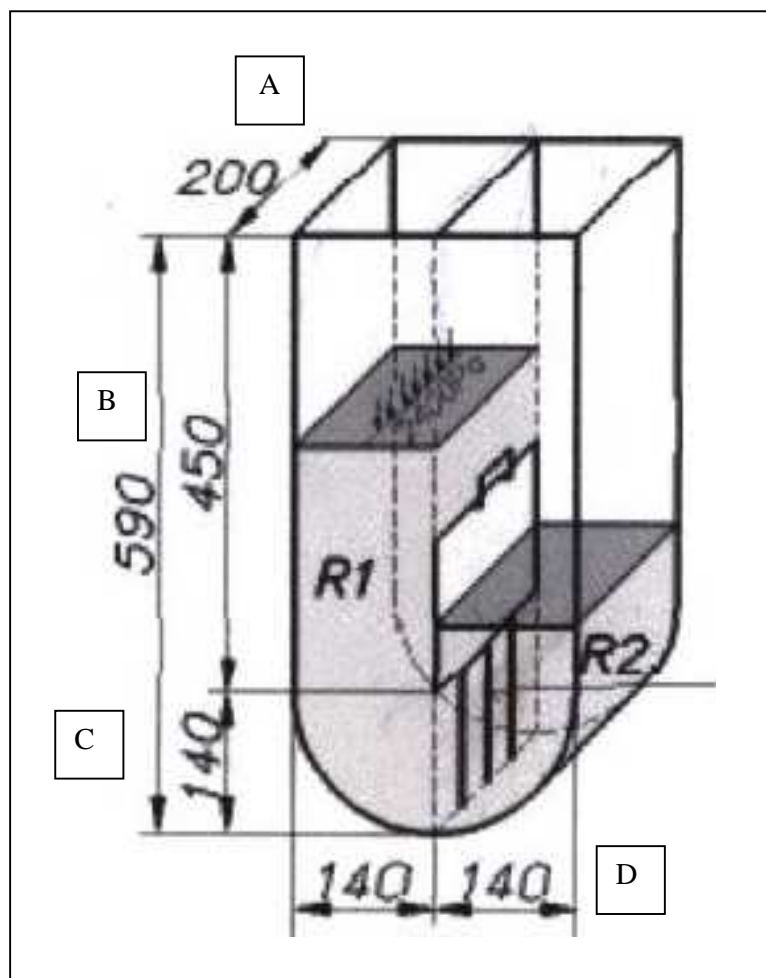


Figura 14: medidas do *u-box* recomendados (fonte: EFNARC, 2002, p.28)

Como no *l-box*, estas armaduras devem ser projetadas caso a caso, a fim de se ter uma precisão maior nos resultados dos testes. Quando o concreto passa de um compartimento para o outro sofre uma resistência ao movimento, e quanto mais íntegro e coeso passar, sem segregar, mais auto-adensável está mostrando ser. Este equipamento é de difícil confecção e depois de pronto pode ser frágil, dependendo do material, o que dificulta seu uso em campo, sendo mais apropriado para uso em laboratório.

2.5.6.2 Execução do ensaio

Para a execução deste ensaio são necessários uma concha côncava, uma espátula, uma trena e cerca de 16 litros de concreto no estado fresco, que devem ser coletados de acordo com a **NBR NM 33** (ABNT, 1998a) e colocados sem vibração ou compactação externa de qualquer natureza no compartimento da esquerda do aparato, com o portão fechado. É importante que

antes da colocação da mistura, se umedeça o equipamento para que este não absorva água do concreto, assim como se teste o portão, para que nenhuma partícula dificulte sua abertura durante o ensaio. O equipamento deve estar sobre um chão firme e nivelado e após o preenchimento, a mistura deve descansar por 1 minuto e só então o portão deve ser aberto, fazendo com que o concreto escoe através das armaduras para o outro compartimento. Assim que o movimento se estabilizar, deve-se medir as alturas R1 e R2, respectivamente a altura do material que ficou no compartimento da esquerda e da direita, e determinar o valor $R1 - R2$. Quanto mais fluida a mistura for, mais próximo do zero esta subtração irá resultar, indicando que o concreto é auto-adensável, sendo que o limite máximo pode variar de 24,2 mm até 80 mm de diferença, como pode ser observado na tabela 16, sendo que Coppola (2000, p.43) descreve os valores em percentual. Novamente a observação do movimento da mistura é muito importante para identificar algum tipo de segregação, uma vez que o concreto coeso deve sempre fluir uniformemente, com todos os seus componentes unidos, sem separação.



Figura 15: ensaio do *u-box* em andamento

Tabela 16: limites de resultados e dimensões para o *u-box test*,
segundo diversas referências

REFERÊNCIA	R2 – R1 (mm)		DIMENSÕES (mm)			
	MÍNIMO	MÁXIMO	A	B	C	D
EFNARC (2002)	0	30	200	590	140	140
FURNAS (2004f)	-	-	200	680	190	140
Gomes (2002)	0	80	200	680	190	140
Araújo <i>et al.</i> (2003)	0	30	-	-	-	-
Noor e Uomoto (1999)	0	24,2	200	680	190	140
Shindoh e Matsuoka (2003)	0	80	200	680	190	140
Coppola (2000)	90%	100%	200	680	190	140

2.5.7 *Fill box test*

2.5.7.1 Introdução

Este equipamento é utilizado por EFNARC (2002, p.29 e 30), FURNAS (2004b, p.1-7) e Gomes (2002, p.14 e 15), e é conhecido por *fill box*, método de *Kajima* ou *vessel test*. Este equipamento mede a capacidade do concreto passar coeso, sem segregar, por obstáculos, como armaduras e eletrodutos. O aparato, ilustrado na figura 16, consiste em uma caixa transparente de 50 cm de comprimento, por 30 cm de altura e 30 cm de largura, com 35 barras de PVC de 20 mm de diâmetro espaçadas 5 cm de eixo a eixo, distribuídas ao longo da caixa. Insere-se no topo do aparelho uma barra de 100 mm de diâmetro com um funil de 200 mm de diâmetro, que será a entrada da amostra de concreto, de aproximadamente 45 litros e coletada de acordo com a **NBR NM 33** (ABNT, 1998a). A altura do material nas duas extremidades do equipamento é H1 e H2, e a capacidade de preenchimento 'F' do concreto é calculado de acordo com a equação 1.

$$F = 100 * \frac{(H1 + H2)}{2 * H1} \quad (\text{eq. 1})$$

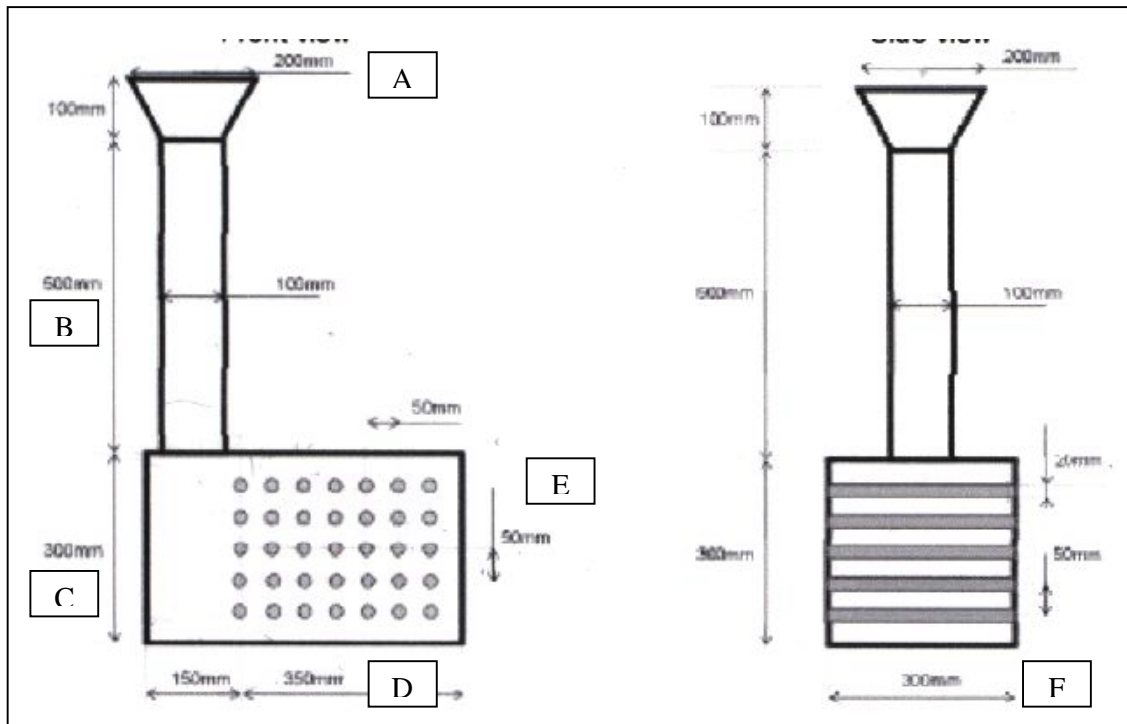


Figura 16: medidas do *fill box* recomendadas (fonte: EFNARC, 2002, p.29)

2.5.7.2 Execução do ensaio

Para a realização deste ensaio são necessários o equipamento com as medidas já determinadas, com material transparente e que não absorva indevidamente a água do concreto, uma concha côncava de capacidade entre 1,5 litros e 2 litros de material e uma trena. Apenas um operador é suficiente. Primeiramente, deve-se colocar o equipamento em um solo firme e nivelado, para depois umedecer suas paredes sem que algum excesso de água permaneça. Preencher o *fill box* com a amostra de concreto, cuidando para que seja derramado uma concha côncava a cada 5 segundos, e até que a mistura envolva a última barra de PVC. Medir duas alturas em cada face com a trena e a média aritmética destas duas será o H1 e o H2 e, então, calcular 'F'. Todo o ensaio deve ser executado em menos de oito minutos.

Caso a capacidade de preenchimento da mistura seja inferior a 90%, significa que o concreto deve ser ajustado para que alcance tal exigência, devendo ser fluidificado mantendo a coesão. Durante o procedimento, é importante a observação de ocorrência ou não de segregação, pois

o concreto deve estar coeso ao passar pelas barras de aço, ou seja, se a argamassa chegar na extremidade da caixa oposta ao local de sua colocação, antes do agregado graúdo, significa que a mistura está segregando e alguma correção é necessária.

Para a mistura ser considerada auto-adensável, 'F' deve estar situada entre 90% e 100%, por ser uma unanimidade entre outros autores, como mostra a tabela 17.

Tabela 17: limites de resultados e dimensões para o *fill box test*, segundo diversas referências

REFERÊNCIA	F (%)		DIMENSÕES (mm)					
	MÍNIMO	MÁXIMO	A	B	C	D	E	F
EFNARC (2002)	90	100	200	500	300	500	50	300
FURNAS (2004b)	-	-	200	500	300	500	50	300
Gomes (2002)	-	-	-	-	300	500	50	-
Araújo <i>et al.</i> (2003)	90	100	-	-	-	-	-	-
Palma (2001)	-	100	-	500	-	-	50	-

2.5.8 U-shaped pipe test

2.5.8.1 Introdução

Resistência à segregação significa que a distribuição dos agregados graúdos deve ser bem distribuída em todos os lugares e níveis. Ou seja, o concreto não pode segregar nem horizontal e nem verticalmente, por isso é necessário que exista um método rápido e simples para o teste da coesão da mistura (BUI *et al.*, 2002, p.1489).

Este procedimento foi totalmente desenvolvido por Gomes (2002, p.70-73), e serve para mensurar a segregação de um concreto auto-adensável. Existem outros métodos para analisar a resistência a segregação, como o de Bui *et al.* (2002), o de Lowke *et al.* (2003, p.356), o proposto pela GTM (EFNARC, 2002, p.30), o proposto por Sedran e De Larrard (Gomes, 2002, p.15), o de Khayat (Gomes, 2002, p.16) e o de Khayat e Guizani (Gomes, 2002, p.16), mas todos estes ou exigem muito tempo e esforço ou são imprecisos. Uma das vantagens

deste equipamento, é que necessita de poucos recursos para construí-lo, é fácil de manejar e limpar, assim como o procedimento é simples. Mas apenas concretos fluidos podem ter sua segregação testada e o tempo de duração depende do início de pega de cada aglomerante. O *u-shaped pipe* é composto por três tubos de PVC de diâmetro interno de 156 mm, conforme a figura 17. O primeiro e o terceiro tubo tem 570 mm de comprimento, enquanto o segundo mede 800 mm, e todos são serrados ao meio e presos com braçadeiras metálicas, para que possam ser abertos sem danificar o concreto que está no interior. Cerca de 32 litros da mistura, coletadas de acordo com a **NBR NM 33** (ABNT, 1998a) são necessárias para a execução do teste, que nada mais é que uma comparação entre três corpos de prova retirados de três locais diferentes do 'U'.

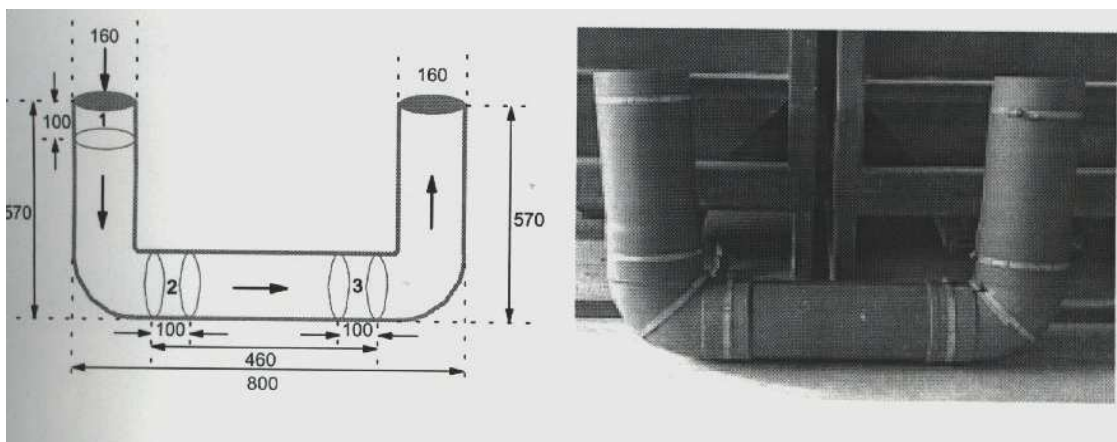


Figura 17: medidas do *u-shaped pipe* recomendadas e forma após desfôrma (fonte: GOMES, 2002, p.71)

2.5.8.2 Execução do ensaio

Para a execução deste teste são necessários pelo menos dois operadores, o equipamento de PVC, uma base de madeira para firmar os tubos, uma trena, uma pá côncava, uma serra, uma balança e uma peneira de 5 mm. Deve-se colocar o concreto no topo do primeiro tubo, que irá cair verticalmente, para, após, percorrer horizontalmente o segundo tubo, para alcançar o terceiro e subir verticalmente até o topo. Acredita-se que este caminho é representativo das condições reais que podem ocorrer em uma obra convencional. Após a colocação do material

no interior do aparato, espera-se cerca de três horas, que é o tempo do concreto obter uma certa resistência para não se desmanchar, mas sem ocorrer a pega total, e coloca-se o equipamento na horizontal, para separar as duas partes do tubo. Então, extrai-se as três amostras, indicadas na figura 17, de 10 cm de comprimento e, na peneira de 5mm, lava-se as amostras para que ocorra a separação dos constituintes e se obtenha o agregado graúdo limpo. Estes devem ter sua superfície seca com papel toalha, para que sua massa seja determinada. A massa da amostra 1 é a referência, que será dividida pelas massas 2 e 3, e a menor relação será a quantificação da segregação (RS), calculada conforme a equação 2.

$$RS = \frac{P1}{P2} \text{ ou } \frac{P1}{P3} \quad (\text{eq.2})$$

Se a relação RS for menor que 90%, mostra que o concreto está segregando, ou seja, é necessário que se adicione materiais finos ou aditivo modificador de viscosidade para dar uma maior coesão à mistura. Após a extração dos exemplares, pode-se deixar o restante do concreto endurecer, para que se possa dividir os pedaços ao meio e analisar visualmente a segregação, pois um bom CAA partido ao meio deve ter os agregados graúdos distribuídos uniformemente.

2.5.9 *Orimet test*

2.5.9.1 Introdução

Este equipamento foi desenvolvido por Bartos em 1978 (Gomes, 2002, p.12) e é descrito baseado em EFNARC (2002, p.31 e 32), FURNAS (2004e, p.1-7) e Gomes (2002, p.12). Inicialmente foi desenvolvido para concretos de alta trabalhabilidade e, atualmente, para concretos auto-adensáveis. A tabela 18 ilustra valores propostos pelos autores citados, e, por ser utilizado pela maioria dos pesquisadores, foram adotados o limite e o equipamento que será descrito a seguir. O *orimet* consiste em um tubo de 100 mm de diâmetro interno com uma redução para 75 mm e uma comporta inferior, que serve para liberar a passagem, como mostra a figura 18. Para a realização deste procedimento são necessários cerca de 10 litros de

material, coletados de acordo com a **NBR NM 33** (ABNT, 1998a). Este teste verifica a fluidez do material, e pode verificar a sua habilidade de passar por obstáculos sem segregar, caso coloque-se duas barras perpendiculares de 10 mm. Também é possível a realização do *orimet* em conjunto com o *j-ring*, para que não precise adicionar estas duas barras.

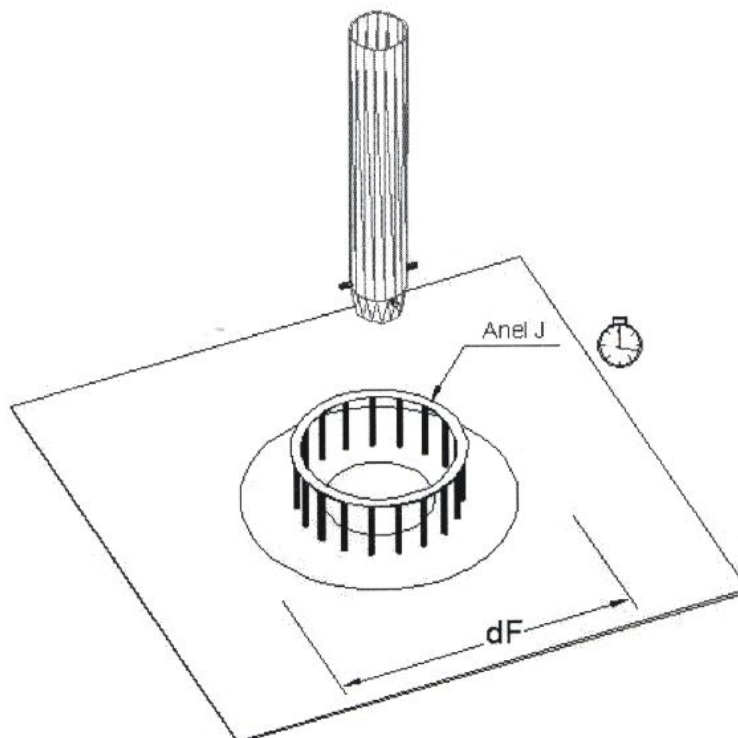


Figura 18: ensaio do *orimet test* em conjunto com o *j-ring test* (fonte: FURNAS, 2004e, p.7)

2.5.9.2 Execução do ensaio

Para a realização deste ensaio são necessários o equipamento feito com material não absorvente ou quimicamente reagente com os componentes, um balde com capacidade para cerca de 10 litros, uma concha côncava, uma espátula, um cronômetro e pelo menos dois operadores. Primeiramente deve-se fixar o equipamento em um chão firme e nivelado e umedecer as paredes do tubo. Preencher o tubo com a concha côncava e tirar qualquer excesso de material com a espátula, para então abrir a comporta inferior e cronometrar o tempo em que o concreto flui através do orifício.

Tabela 18: limites de resultados para o *orimet test*, segundo referências

REFERÊNCIA	TEMPO (s)	
	MÍNIMO	MÁXIMO
EFNARC (2002)	0	5
Gomes (2002)	0	3
Araújo <i>et al.</i> (2003)	0	5
Peterssen (1999)	2	20

2.5.10 *J-ring test*

2.5.10.1 Introdução

O *j-ring test* é uma complementação do *slump flow test*, do *orimet test* ou até mesmo do *v-funnel test*, pois estes não tentam simular as armaduras de uma estrutura real, e procedimentos similares podem ser encontrados no EFNARC (2002, p.23 e 24), Tviksta (2000, p.18) e Gomes (2002, p.8 e 9). É constituído por um anel de barras de aço, espaçados conforme a armadura real que se deseja simular, mas normalmente seu diâmetro é de 300 milímetros, a altura é de 100 mm e o espaçamento entre barras deve ser maior que 3 vezes o diâmetro máximo do agregado graúdo. A figura 19 ilustra o *j-ring* em conjunto com o *slump flow test*. Esta combinação de testes permite a verificação da fluidez e da habilidade do concreto passar por obstáculos, esta última devido ao *j-ring*, e ainda pode-se verificar visualmente a segregação da mistura, uma vez que ao passar pelo anel a argamassa não deve se separar do agregado graúdo.

2.5.10.2 Execução do ensaio

Para a execução do *j-ring test* em conjunto com outro teste para medir a fluidez do concreto, normalmente o *slump flow test*, são necessários dois operadores, o anel metálico, o tronco de cone e base do *slump flow*, um cronômetro, uma trena, uma concha côncava e uma espátula. São dois testes complementares e ainda não se tem certeza da exatidão dos resultados, uma vez que o anel de barras de aço certamente afeta o espalhamento do concreto, embora a

habilidade da mistura de passar por obstáculos, no caso um anel de armaduras, provavelmente não seja influenciada pela fluidez. Primeiramente deve-se umedecer os equipamentos e colocá-los sobre um chão firme e nivelado, para que então se preencha de concreto até o topo do tronco de cone, sem compactação externa ou vibração de qualquer natureza. A amostra deve ser coletada de acordo com a **NBR NM 33** (ABNT, 1998a). Assim, levanta-se o molde verticalmente e se cronometra o tempo em que o concreto alcança o círculo de 500 mm, e mede-se o espalhamento em duas direções perpendiculares para o cálculo do *slump flow*. Em seguida medem-se as alturas interna e externa ao anel de barras de aço em quatro pontos diferentes e se faz a média aritmética, para o cálculo da diferença entre as alturas, que é a medida do *j-ring*. Pode-se ainda verificar visualmente a ocorrência de segregação, pois se o agregado graúdo se separar da argamassa do concreto quando este fluir às extremidades ou quando passar pelo *j-ring*, significa que a mistura não está coesa suficiente, necessitando de ajustes. O valor do ensaio é diferença de altura entre o concreto imediatamente interior e imediatamente exterior ao anel e esta diferença não pode exceder a 10 milímetros, valor adotado pela maioria dos autores citados, como descrito na tabela 19.

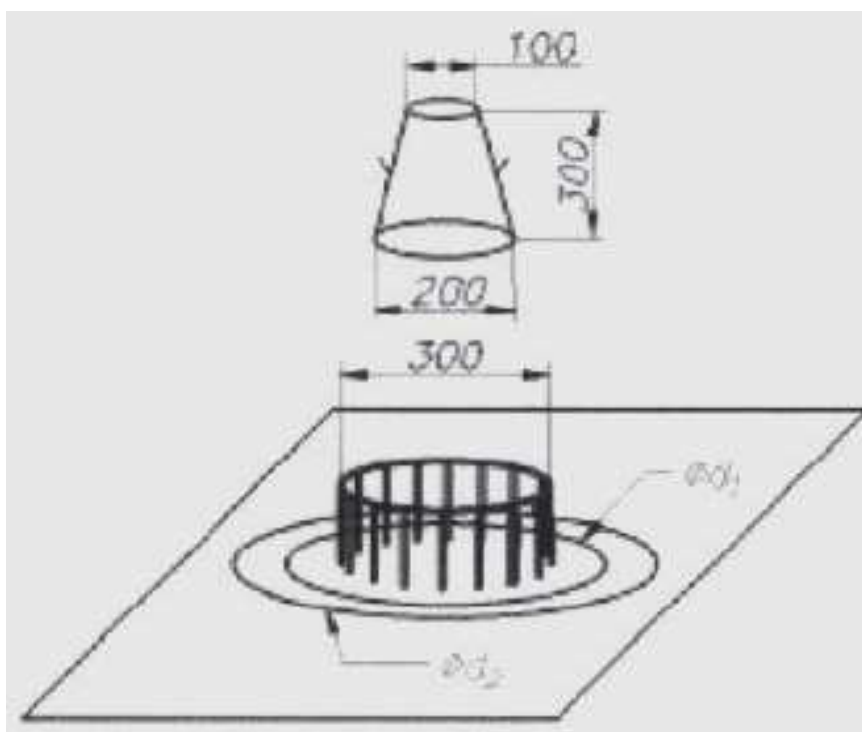


Figura 19: ensaios de *slump flow test* com a complementação do *j-ring test* (fonte: EFNARC, 2002, p.23)

Tabela 19: limites de resultados para o *j-ring test*, segundo diversas referências

REFERÊNCIAS	TEMPO (s)	
	MÍNIMO	MÁXIMO
EFNARC (2002)	0	10
Araújo <i>et al.</i> (2003)	0	10
Tviksta (2000)	-	15

2.5.11 Considerações finais

Rigueira Victor *et al.* (2003) propuseram alguns destes ensaios em tamanho reduzido, para que a execução dos procedimentos seja realizada rapidamente e com um volume pequeno de material. Eles testaram o *slump flow test*, *v-funnel* e *l-box* e concluíram, baseados nos resultados obtidos, que os aparelhos usuais podem ser substituídos pelos reduzidos.

A tabela 20 resume os valores mínimo e máximos aceitos pela maior parte dos pesquisadores para cada equipamento de medição da trabalhabilidade do CAA, descritos nos itens anteriores. Observa-se que existe mais de um tipo de equipamento para medir cada uma das propriedades do CAA no estado fresco. Analisando-se a facilidade de execução dos ensaios de cada aparelho, pode-se concluir que o *slump flow test* é o ensaio mais adequado para medir a fluidez, o *l-box*, para medir a habilidade do CAA passar coeso por obstáculos, e os dois anteriores mais o *u-shaped pipe*, para avaliar a resistência à segregação do material. Salienta-se, novamente, que estes ensaios não foram normalizados ainda, logo, pode-se haver divergências nos valores e medidas adotadas.

Tabela 20: valores aceitos pela maioria dos pesquisadores para os equipamentos de trabalhabilidade

	Ensaio	Unidade	Valores típicos	
			Mínimo	Máximo
1	<i>Slump flow</i>	milímetro	600	750
2	<i>slump flow</i> t _{50cm}	segundo	3	7
3	<i>v-funnel</i>	segundo	6	12
4	<i>v-funnel</i> (acrécimo tempo)	segundo	0	3
5	<i>l-box</i>	(h2 / h1)	0,80	1,00
6	<i>u-box</i>	(h2 – h1) mm	0	30
7	<i>fill-box</i>	percentagem %	90	100
8	<i>u-shaped pipe</i>	percentagem %	90	100
9	<i>orimet</i>	segundo	0	5
10	<i>j-ring</i>	milímetro	0	10

3 MÉTODOS DE DOSAGEM PARA CAA

3.1 INTRODUÇÃO

Segundo Aitcin (2000, p.243), o objetivo de qualquer método de dosagem é determinar uma combinação adequada e econômica dos constituintes do concreto, que possa ser usada para a primeira mistura experimental com vista a produzir um concreto que possa estar próximo daquele que consiga um bom equilíbrio entre as várias propriedades desejadas, ao menor custo possível. Dosar concretos, sob alguns aspectos, pode ser entendido como a administração de aspectos conflitantes, já que a maior economia nem sempre está associada a melhor trabalhabilidade, a maior durabilidade ou até mesmo a melhor resistência mecânica. Assim, não estará errado pensar em dosagem como a tarefa de contrabalançar a ciência e a arte, contrapondo parâmetros objetivos e subjetivos (RECENA, 2002, p.16).

Um dos fatores que pode estar atrasando a propagação do concreto auto-adensável em edificações, no Brasil e no mundo, é a falta de métodos de dosagem eficientes, que permitam o uso irrestrito da mistura com materiais locais viáveis, tanto econômica quanto tecnicamente. Osawa desenvolveu o CAA em 1988, baseado em pontos específicos propostos por Okamura, os quais continuam sendo seguidos por muitos pesquisadores e grupos, como EFNARC (2002) e Bosiljkov (2003), mas estes parâmetros foram estimados através de ensaios realizados na época com o intuito de obter algum ponto de partida, ou seja, devem ser aprimorados e ajustados para os materiais disponíveis atualmente, pois alguns componentes não existiam ou foram melhorados, como os aditivos.

Segundo Su *et al.* (2001), ainda existem outros métodos de dosagem, como o proposto por *Japanese Ready-Mixed Concrete Association (JRMCA)*, que pode ser entendido como uma versão simplificada do método do Okamura (JRMCA, 1998), *Laboratory Central Des Ponts et Chaussées (LCPC)*, *Swedish Cement and Concrete Research Institute (CBI)*, grupos de pesquisadores da China e de Taiwan, Gomes e Su *et al.* O LCPC baseia-se no reômetro BTRHEON e em um software desenvolvido para este estudo, ou seja, para seguir este método deve-se adquirir os equipamentos, o que encarece o processo (DE LARRARD, 1999). Os métodos propostos pelo CBI e pelos pesquisadores chineses ainda não estão definitivamente

consagrados, enquanto os pesquisadores de Taiwan apresentaram uma metodologia derivada da teoria da densidade máxima e do excesso de pasta, o que é complicado para se reproduzir.

Os métodos de Okamura (1995), de Gomes (2002) e de Su *et al.* (2001) serão descritos resumidamente, por serem os mais fáceis de se reproduzir ou os mais importantes. Serão ressaltadas vantagens e desvantagens, para que seja explicado detalhadamente no próximo capítulo o método de proporcionamento proposto. Caso se pretenda conhecer os detalhes destes métodos, deve-se pesquisar as referências citadas.

3.2 MÉTODO DE DOSAGEM PROPOSTO POR OKAMURA (1995)

3.2.1 Descrição do método

Como foi descrito em capítulos anteriores, Okamura desenvolveu um método de proporcionamento para o concreto auto-adensável em 1995 (OKAMURA e OUCHI, 2003), ao aprimorar suas premissas definidas em 1986, com o intuito de resolver o problema da baixa durabilidade das construções japonesas, ao diminuir o número de trabalhadores qualificados nos canteiros de obra. Para um concreto ser dosado de modo que cumpra os requisitos da auto-adensabilidade, deve possuir (OKAMURA e OUCHI, 2003):

- a) limitada quantidade de agregados,
- b) baixa relação água/cimento,
- c) altas dosagens de aditivo superplastificante.

Um esquema do procedimento da dosagem de Okamura está representado na figura 20, onde observa-se que a quantidade de agregado graúdo foi limitada em 50% do volume total de concreto, enquanto a quantidade de agregado miúdo foi limitada em 40% do volume total da argamassa. A dosagem do aditivo superplastificante e a relação água/cimento não foram quantificadas, embora Okamura (1997, p.52) especifique que a relação a/c deve se situar entre 0,90 e 1,00, em volume, dependendo das propriedades dos finos, enquanto o aditivo é

determinado experimentalmente, até o material apresentar as características esperadas. Na figura 21 pode-se analisar, segundo Okamura e Ouchi (2003), um comparativo entre as proporções dos materiais do CAA e do concreto convencional. Observa-se que as quantidades de ar incorporado, água e agregado miúdo ficam constantes, aumentam os finos (cimento, fíler, adições e outros) do CAA em relação ao consumo de cimento do concreto convencional, e este aumento é compensado com a diminuição do agregado graúdo. Ou seja, simplesmente troca-se brita por finos e adiciona-se aditivo para a obtenção do CAA.

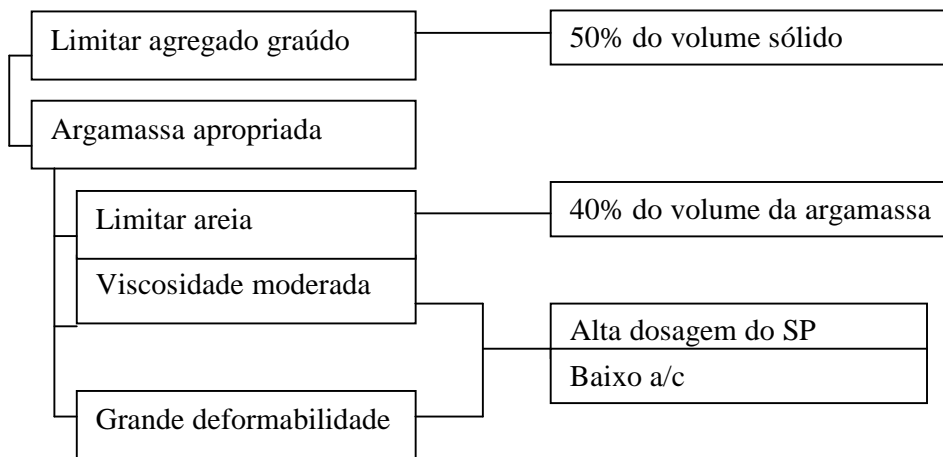


Figura 20: esquema do procedimento de dosagem (fonte: OKAMURA e OUCHI, 2003, p.6)

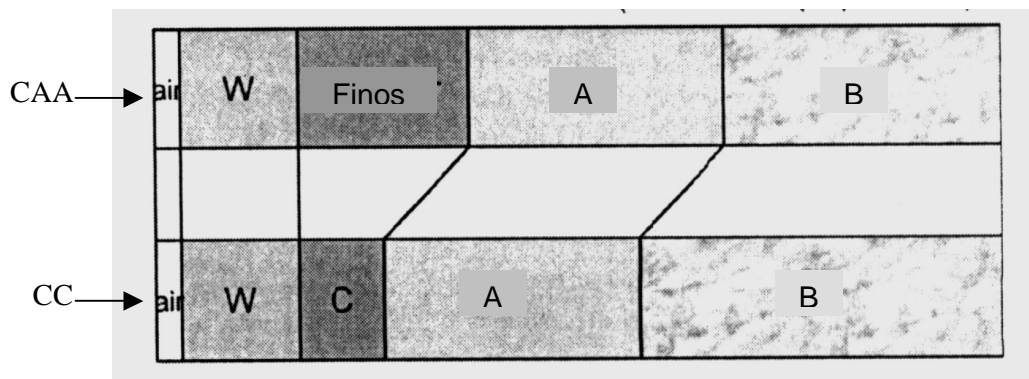


Figura 21: comparação da proporção dos materiais do concreto convencional e auto-adensável (fonte: OKAMURA e OUCHI, 2003, p.5)

Na figura 21, 'air' significa ar incorporado, 'W' significa água, 'C' é o consumo de cimento, 'A' significa o agregado miúdo (areia) e 'B' é o agregado graúdo (brita).

Ensaio como o *u-box*, *v-funnel* e *slump flow* são indicados por Okamura para verificar se o concreto é auto-adensável para a estrutura, pois caso a mistura necessite de correções, deve-se realizar dois testes para medição das propriedades da argamassa e caracterização dos materiais, mostrados nas figuras 22 e 23, que são o *slump flow* e o *v-funnel* em escala reduzidas. Estes ensaios testam a deformabilidade (equação 3) e a viscosidade (equação 4) do concreto e a deformabilidade (equação 5) e a viscosidade (equação 6) da argamassa.

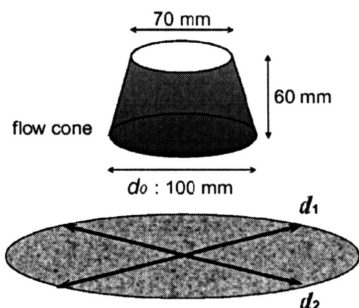


Figura 22: *slump flow* para argamassas (OKAMURA e OUCHI, 2003, p.7)

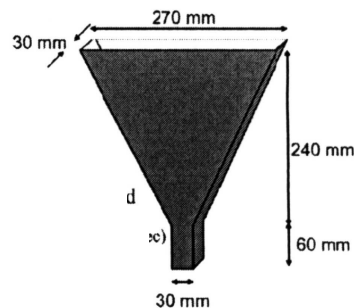


Figura 23: *v-funnel* para argamassas (OKAMURA e OUCHI, 2003, p.7)

$$\Gamma_c = \frac{(sf_1 * sf_2 - sf_0^2)}{sf_0^2} \quad (\text{eq. 3})$$

$$R_c = \frac{10}{t_c} \quad (\text{eq. 4})$$

$$\Gamma_a = \frac{(d_1 * d_2 - d_0^2)}{d_0^2} \quad (\text{eq. 5})$$

$$R_a = \frac{10}{t_a} \quad (\text{eq. 6})$$

Sendo que Γ_c é a deformabilidade do concreto, R_c é a viscosidade, sf_1 e sf_2 são as medidas dos diâmetros perpendiculares do *slump flow test* para concretos, sf_0 é o diâmetro da parte inferior do tronco de cone e t_c é o tempo em que o concreto escoa no *v-funnel*. Da mesma forma Γ_a , R_a , d_1 , d_2 , d_0 e t_a tem os mesmos significados, porém para a argamassa do concreto.

3.2.2 Comentários do método

As considerações iniciais de Okamura em 1986, que posteriormente transformar-se-iam em um método de dosagem, em 1995, foram muito importantes para o desenvolvimento do moderno concreto auto-adensável. Estas considerações foram a base do estudo e sem elas, provavelmente, não existiria atualmente este tipo de mistura. Mas são apenas os primeiros passos, não devendo serem mais utilizadas, pois não há como dosar um concreto apenas com limites superiores de quantidade e com termos altamente abrangentes, como alta dosagem de aditivo superplastificante e baixa relação a/c. Este método também não considera a utilização de finos pozolânicos, como sílica ativa, metacaulim ou cinza volante e aditivos modificadores de viscosidade. Também não possui uma seqüência clara de passos a serem seguidos, fazendo com que, se um responsável por dosagem utilizar este método, teria de realizar inúmeras tentativas para alcançar os requisitos esperados. Também observa-se que, apesar de Okamura propor a execução de ensaios para medir a trabalhabilidade da argamassa em tamanho reduzido, não se conhece os limites esperados,

3.3 MÉTODO DE DOSAGEM PROPOSTO POR NAN SU *ET AL.* (2001)

3.3.1 Descrição do método

Este método é a descrição de um passo-a-passo com o objetivo de se obter uma primeira mistura de um concreto auto-adensável, cuja principal consideração é o preenchimento do vazio do esqueleto dos agregados graúdos pouco compactados com argamassa. Normalmente a taxa de compactação de agregados graúdos é de 52 a 58%, ou seja, há de 42 a 48% de vazios que necessitam ser ocupados pela argamassa do concreto. Com este método é preciso somente que se escolha materiais adequados, se faça os cálculos, os testes de trabalhabilidade e ajustes finais de traço e se obterá um concreto auto-adensável com elevada fluidez e resistência à segregação, segundo as especificações da *Japanese Society of Civil Engineering* (JSCE) *apud* Su *et al.* (2001, p.1800), ilustradas na tabela 21.

Tabela 21: especificações para o CAA

Classe de fluidez do concreto		1	2	3
Condições de construção	Abertura crítica (mm)	30 - 60	60 - 200	≥ 200
	Taxa de armadura (kg/m ³)	≥ 350	100 - 350	≤ 100
<i>U-Box test</i> (mm)		≥ 300	≥ 300	≥ 300
Volume absoluto de agregado graúdo por volume de CAA (m ³ /m ³)		0,28 - 0,30	0,30 - 0,33	0,30 - 0,36
Fluidez	<i>Slump flow</i> (mm)	650 - 700	600 - 700	500 - 650
Resistência à segregação	<i>V-Funnel test</i> (s)	10 - 20	7 - 20	7 - 20
	<i>Slump flow T50cm test</i>	5 - 25	3 - 15	3 - 15

(fonte: *Japanese Society of Civil Engineering (JSCE) apud SU et al., 2001, p.1800*)

Passo 1: cálculo das quantidades de agregados miúdo e graúdo

Através das equações 7 e 8, pode-se calcular as massas de agregados graúdo e miúdo.

$$Mg = FV * Munitg * (1 - S/m) \quad (\text{eq. 7})$$

$$Ma = FV * Munita * (1 - S/m) \quad (\text{eq. 8})$$

Sendo que Mg e Ma são, respectivamente, as massas de agregados graúdo e miúdo (kg/m³), FV é a fração de volume dos agregados compactados, Munitg e Munita são, respectivamente, as massas unitárias dos agregados no estado solto e S/m é o fator de agregados miúdos em relação ao total de agregados, que varia de 50 a 57%. A dimensão máxima do agregado graúdo pode ser de 15, 20 e 25 milímetros, mas a de 20mm é a mais comum.

Passo 2: cálculo do consumo de cimento

O cálculo do consumo de cimento é realizado pela equação 9, mas os autores recomendam que seja utilizado no mínimo 270-290 kg/m³ para garantir estruturas com alta durabilidade, mas deve-se ter cuidado, pois alta quantidade de cimento aumenta a retração do concreto. Em Taiwan, utiliza-se a relação 0,14 MPa/kg ou 20 psi/kg de cimento.

$$C = \frac{f'c}{0,14} \quad (\text{eq. 9})$$

Sendo, C o consumo de cimento (kg/m^3) e $f'c$ é a resistência à compressão requerida (MPa).

Passo 3: cálculo da quantidade de água na mistura

Esta parte do método é bastante similar ao cálculo com o concreto convencional. Com a quantidade de cimento já determinada, deve-se estabelecer a relação água/cimento em função das solicitações locais, e calcular a água através da equação 10.

$$A = (a/c) * C \quad (\text{eq. 10})$$

Sendo, A a quantidade de água (kg/m^3), a/c a relação água/cimento e C a quantidade de cimento (kg/m^3).

Passo 4: cálculo da quantidade cinza volante e escória de alto forno

No concreto auto-adensável é necessário uma grande quantidade de materiais finos para aumentar a fluidez e facilitar a auto-adensabilidade, mas deve-se ter cuidado pois o excesso de cimento aumenta o custo do concreto, bem como a retração e ainda deve aumentar a resistência à compressão a níveis acima do desejado. Por isto, este método utiliza a relação a/c e a quantidade de cimento para alcançar as características de projeto, e a cinza volante e escória alto forno para garantir a resistência à segregação e elevar a porcentagem de pasta. Como já se tem as quantidades de todos os outros componentes do CAA, o volume que falta para completar 1m^3 pertence a estas duas adições, como ilustra a equação 11.

$$V_{pcv} + V_{pes} = 1 - \frac{Mg}{1000 * M_{espg}} - \frac{Ma}{1000 * M_{espa}} - \frac{C}{1000 * M_{espc}} - \frac{A}{1000 * M_{espa}} - Var \quad (\text{eq.11})$$

Sendo que, V_{pcv} é o volume de cinza volante, V_{pes} é o volume de escória alto forno, M_{espg} é a massa específica do agregado graúdo, M_{espa} é a massa específica do agregado miúdo, M_{espc} é a massa específica do cimento, M_{espa} é a massa específica da água e Var é o ar incorporado ao CAA (%).

Pode-se afirmar que a massa total destes dois materiais pozolânicos é M_t (kg/m^3), onde a porcentagem de cinza volante é CV% e a de escória alto forno é ES% em massa, as relações

água/adições é a/cv e a/es , $Mespcv$ é a massa específica da cinza volante e $Mespes$ é a massa específica da escória alto forno, assim tem-se a equação 12.

$$V_{pcv} + V_{pes} = (1 + a/cv) * CV\% * \frac{Mt}{1000 * Mespcv} + (1 + a/es) * ES\% * \frac{Mt}{1000 * Mespes} \quad (\text{eq.12})$$

Os autores consideram que a relação a/c é igual à relação a/cv e a/es , as massas específicas se obtém através de ensaios normalizados, através da **NBR NM 23** (ABNT, 2001a) e $CV\%$ e $ES\%$ são definidos pela experiência do profissional ou pelas características dos materiais. O cálculo das massas das adições é feito diretamente pelas equações 13 e 14.

$$M_{cv} = CV\% * Mt \quad (\text{eq. 13})$$

$$M_{es} = ES\% * Mt \quad (\text{eq. 14})$$

A água requerida para a mistura devido a estes materiais é dada pelas equações 15 e 16.

$$A_{cv} = a/cv * M_{cv} \quad (\text{eq. 15})$$

$$A_{es} = a/es * M_{es} \quad (\text{eq. 16})$$

Passo 5: cálculo da quantidade total de água

A quantidade total de água é a soma de água requerida pelo cimento, cinza volante e escória alto forno, como mostra a equação 17, e se recomenda que fique entre 160 e 185 kg/m³.

$$A_t = A_c + A_{cv} + A_{es} \quad (\text{eq 17})$$

Passo 6: cálculo da dosagem de aditivo superplastificante (SP)

Ao se adicionar corretamente o aditivo, pode-se aumentar a fluidez, a habilidade do CAA passar por obstáculos e a resistência à segregação, permitindo alcançar as características esperadas. O aditivo é composto por partículas sólidas (m%) e água (Asp), a qual deve ser descontada da água da mistura. A dosagem do SP é igual a n% da massa dos aglomerantes, assim as equações 18 e 19 permitem o cálculo da massa do aditivo (M_{sp}) e da quantidade de água presente (A_{sp}).

$$M_{sp} = n\% * (C + Mcv + Mes) \quad (\text{eq. 18})$$

$$A_{sp} = (1 - m\%) * M_{sp} \quad (\text{eq. 19})$$

Passo 7: ajuste da quantidade água

A atual quantidade de água calculada deve ser ajustada caso os agregados utilizados estejam úmidos.

Passo 8: primeiras misturas e testes de trabalhabilidade do CAA

Os primeiros traços devem ser rodados para que se observe se a mistura está de acordo com o planejado e para que se realize os ensaios de trabalhabilidade propostos, ou seja, os resultados do *slump flow*, do *u-box*, *l-box* e *v-funnel* devem estar dentro das especificações já comentadas, a exsudação e segregação devem ser satisfatórias, a relação a/agl deve satisfazer os requisitos de desempenho e durabilidade e o ar incorporado deve estar de acordo com o programado.

Passo 9: ajuste final da mistura

Caso algum dos requisitos acima não estejam sendo atendidos, ajustes devem ser feitos de modo que o concreto se enquadre nos limites de auto-adensabilidade. Por exemplo, se a mistura estiver pouco fluida, deve-se aumentar a dosagem de aditivo ou a argamassa do concreto, para aumentar a trabalhabilidade.

3.3.2 Comentários do Método

Este método, proposto por Nan Su *et al.* (2001), é o mais usual para dosagem de concretos auto-adensáveis de resistências à compressão convencionais, pois é simples e considera algumas variações dos materiais, o que o torna mais confiável.

Mas este procedimento possui alguns pontos que merecem ser estudados profundamente, como as incógnitas de cálculo da quantidade de agregados, o cálculo do consumo de cimento, da cinza volante e da escória alto forno e suas proporções. É necessário que se determine

vários parâmetros para o cálculo da quantidade de agregados do CAA, como a fração de volume dos agregados compactados, suas massas unitárias e a relação agregado miúdo/total de agregados. Para alcançar este objetivo, é necessário a execução de testes específicos para tal ou então utilizar valores encontrados por outros pesquisadores, realizados com outros materiais, que nem sempre são parecidos com os valores reais. Outro ponto questionável é o cálculo do consumo de cimento, que depende exclusivamente da resistência à compressão requerida. Sabe-se que existem diversos tipos de cimento, de agregados, de aglomerantes e de aditivos que influem na resistência final, e se for pretendido estabelecer uma equação universal para o cálculo do consumo de cimento, certamente todas estas variáveis devem ser incluídas. E, finalmente, o método permite apenas a utilização de cinza volante e escória alto forno como adições, quando se sabe que existem outras disponíveis, como sílica ativa, metacaulim e cinza de casca de arroz, e dependendo do local da dosagem, estas últimas podem ser mais econômicas, sendo interessante seu uso. E, de acordo com o método, se calcula a soma de consumo da cinza volante e da escória alto forno, onde a porcentagem de cada uma das adições é determinada pela experiência do responsável pela dosagem, ou seja, pode acontecer de se ter de fazer dezenas de experimentos para que se encontre a melhor relação entre as adições.

3.4 MÉTODO DE DOSAGEM PROPOSTO POR GOMES (2002)

3.4.1 Descrição do Método

O método de Gomes é voltado para a dosagem de CAA de alta resistência (CADAR) e o procedimento está ilustrado na figura 24. O CAR já é uma realidade em muitos países, devido suas elevadas propriedades mecânicas e de durabilidade. Assim, Gomes *et al.* (2003a, p.1) acreditam que, se as vantagens do CAA forem acrescentadas às do CAR, o CADAR terá um futuro promissor. Apesar de não ser um método de dosagem para concretos similares ao método que será proposto neste trabalho, é um método importante para a área, e por isto, também será descrito neste capítulo.

Este procedimento considera o concreto como bifásico, sendo uma fase a pasta e a outra o esqueleto granular, e estas fases podem ser obtidas e otimizadas separadamente, buscando as

propriedades desejadas do material. De acordo com Gomes (2002, p.66), para ser considerado de alta resistência, o CAA deve alcançar os 50 MPa aos 7 dias, logo deve-se:

- a) ter a relação água/aglomerante baixa ($a/agl < 0,40$);
- b) otimizar as relações aditivo superplastificante / cimento (sp/c) e finos / cimento (f/c) para que se obtenha pasta com alta fluidez e boa coesão;
- c) determinar um esqueleto granular com mínimo de vazios possível;
- d) determinar uma pasta com as características de auto-adensabilidade do concreto fresco, assim como a resistência à compressão.

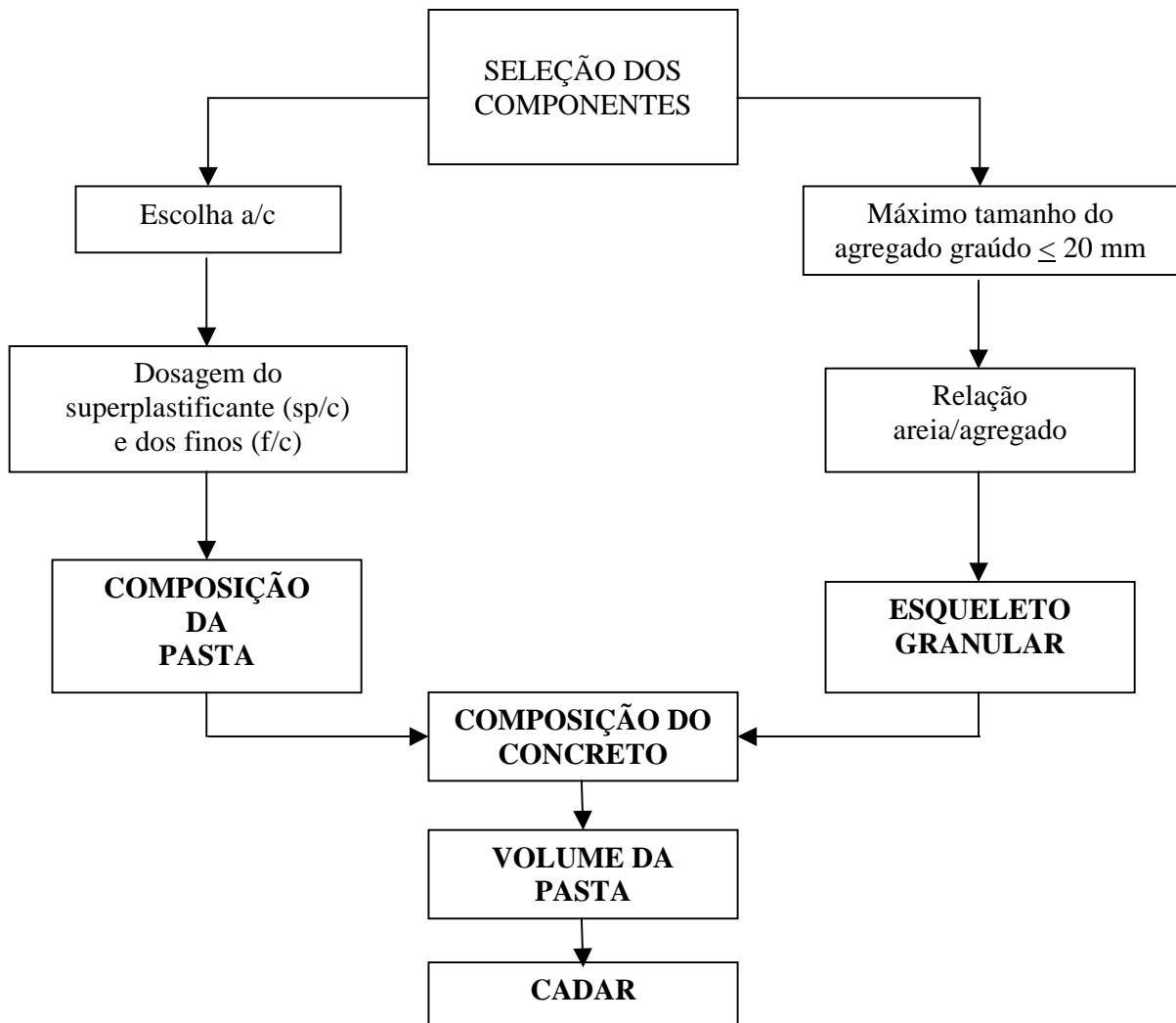


Figura 24: metodologia de dosagem de Gomes (fonte: GOMES, 2002, p.67)

Os componentes do CADAR são, sempre que possível, obtidos entre os disponíveis localmente, para que este concreto seja viável economicamente. Somente em casos específicos onde os materiais locais não satisfaçam as características esperadas, podem ser substituídos por outros, baseado na experiência pessoal do responsável pela dosagem.

A pasta do CADAR deve ser fluida e, ao mesmo tempo, manter a coesão da mistura. Por isso, a dosagem do aditivo superplastificante e dos finos é feita através de testes específicos. O ponto de saturação do aditivo superplastificante e a relação f/c são encontrados através dos testes do cone de *Marsh* em conjunto com o *mini-slump*. A relação a/c é determinada em relação à resistência requerida e, normalmente, se mantém em torno de 0,35 a 0,40.

O volume e o tamanho máximo dos agregados graúdos são limitados pelas propriedades requeridas pelo CADAR. A dimensão máxima característica dos agregados é limitada em 20 mm, normalmente, e quanto menor for a quantidade de partículas de material, menos atrito entre elas ocorrerá no adensamento da mistura. Também deve-se minimizar o volume e os vazios entre os grãos dos agregados, pois assim diminuirá a necessidade de pasta para a lubrificação, atenuando a retração e porosidade do concreto. A relação areia/agregado é obtida experimentalmente, obtendo-se a massa unitária de várias misturas, para adotar o maior valor, que significa a menor quantidade de vazios.

Com as fases da pasta e do esqueleto granular finalizadas, deve-se realizar os testes de trabalhabilidade do concreto para verificar se a mistura corresponde as expectativas, para, caso necessário, fazer correções. Os aparelhos recomendados são *slump flow*, *l-box*, *v-funnel* e *u-shaped pipe*.

3.4.2 Comentários do Método

Este método, que divide o concreto em duas fases, tem diversas vantagens, como a utilização do aditivo superplastificante no seu ponto de saturação, a divisão da dosagem em duas partes e o alcance de altas resistências em um material relativamente novo, oportunizando assim, novas utilizações. Como o aditivo superplastificante é um componente caro se comparado aos outros materiais, deve-se extrair todo o seu benefício quando em uso, e em concretos de alta resistência, provavelmente o mais indicado seria a dosagem no ponto de saturação. Enquanto

que a divisão do procedimento em duas fases permite que o responsável pelo trabalho execute uma tarefa e depois outra, sem atropelos e sobreposições.

Mas também há alguns pontos que, na visão desta dissertação, poderiam ser revistos, como a divisão do CADAR em duas fases, a obtenção da relação a/agl e, principalmente, a limitação do volume de agregados graúdos. Segundo Gomes *et al.* (2003a, p.1), a metodologia assume que o comportamento da fluidez do CADAR é largamente governado pela fluidez da matriz da pasta, podendo ser obtido pela otimização separada da composição da pasta e do esqueleto granular, e o volume da pasta definido no concreto. 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. A obtenção da relação a/agl , fixando-a em 0,35 a 0,40 devido a experimentos anteriores é muito simplista, pois ao mudar os materiais, principalmente o cimento, deve-se re-analisar a relação a/agl . Um profissional que deseje obter um CADAR de determinada resistência à compressão, não tem nem um ponto de partida dado por este método, certamente vai ter de começar utilizando relações a/agl de 0,40 e ir diminuindo ou aumentando para alcançar seu objetivo, e, talvez, tenha de realizar diversas misturas até chegar na esperada.

E, finalmente, este autor acredita que, quanto maior porcentagem de agregado graúdo, mais econômico resultará a mistura final, pois a colocação de argamassa além do necessário para preencher os vazios dos agregados, pode causar problemas de retração, calor de hidratação e custo final do concreto.

4 MÉTODO DE DOSAGEM PROPOSTO

4.1 INTRODUÇÃO

O método para dosar um concreto auto-adensável é o objetivo principal deste trabalho, onde através deste, pode ser dosado um CAA, seguindo um procedimento em passos e a partir de quaisquer materiais locais disponíveis. A base do estudo é o método de dosagem IPT/EPUSP (HELENE e TERZIAN, 1992, p.225-299) para concretos convencionais. Convém lembrar que o concreto auto-adensável é uma evolução do concreto convencional, inclusive eleva o número de componentes de quatro para seis: cimento, água, agregado miúdo, agregado graúdo, finos e aditivos, e, conseqüentemente, torna o proporcionamento mais complexo. Ao se confeccionar um concreto de elevado abatimento do tronco de cone, sem um estudo prévio do seu proporcionamento, observa-se, normalmente, uma acentuada tendência da água subir à superfície. Este movimento, denominado exsudação, dificulta a aderência dos agregados e armaduras com a argamassa do concreto e provoca falhas de concretagem (GIOVANNETTI, 1999, p.27).

O objetivo final deste método é de desenhar um diagrama de proporcionamento e determinar as equações de comportamento, com a lei de Abrams, a lei de Lyse e a equação que relaciona consumo de aglomerantes por metro cúbico com o traço '1:m', para os materiais selecionados previamente, por questões econômicas ou de disponibilidade local. A curva de Abrams, sabe-se, relaciona resistência à compressão com relação água/aglomerante, e a lei de Lyse, a relação a/agl com a quantidade de agregados 'm' para uma certa trabalhabilidade. Então, com o diagrama desenhado, as equações e a trabalhabilidade da mistura determinadas, pode-se obter um concreto com qualquer resistência dentro do intervalo estudado, relação a/agl, quantidade de agregados 'm' ou consumo de aglomerante por metro cúbico, desde que sejam utilizados os mesmos materiais do estudo prévio.

4.2 MÉTODO DE DOSAGEM IPT/EPUSP PARA CONCRETOS CONVENCIONAIS

Este método de dosagem foi desenvolvido para o proporcionamento de concretos convencionais a partir de quaisquer materiais disponíveis regionalmente (HELENE e TERZIAN, 1992). É um método simples, e após a sua realização, permite a confecção de concretos compreendidos na faixa estudada e deve ser executado com os mesmos materiais que serão utilizados na produção em larga escala. O diagrama de dosagem que será desenhado é baseado em leis e correlações, obtidas ao longo dos anos por outros pesquisadores (Abrams, Lyse, Molinari e outros), descritas a seguir pelas equações 20 a 28:

$$f_{cj} = \frac{k_1}{(k_2 * a/c)} \quad (\text{eq. 20})$$

$$m = k_3 + k_4 * a/c \quad (\text{eq. 21})$$

$$C = \frac{1000}{(k_5 + k_6 * a/c)} \quad (\text{eq. 22})$$

$$\alpha = \frac{(1+a)}{(1+m)} \quad (\text{eq. 23})$$

$$m = a + p \quad (\text{eq. 24})$$

$$C = \frac{\gamma}{(1+a+p+a/c)} \quad (\text{eq. 25})$$

$$C = \frac{(1000 - ar)}{\left(\frac{1}{\gamma_c} + \frac{a}{\gamma_a} + \frac{p}{\gamma_p} + a/c \right)} \quad (\text{eq. 26})$$

$$A = C * a/c \quad (\text{eq. 27})$$

$$Cu = C * \gamma_c + C * a * \gamma_a + C * p * \gamma_p + C * a/c * \gamma_g \quad (\text{eq. 28})$$

onde:

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

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

a = relação agregado miúdo seco / cimento em massa, em kg/kg;

p = relação agregado graúdo seco / cimento em massa, em kg/kg;

m = relação agregados secos / cimento em massa, em kg/kg;

α = teor de argamassa seca, deve ser constante para uma determinada situação, em kg/kg;

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

C = consumo de cimento por metro cúbico de concreto adensado, em kg/m^3 ;

γ = massa específica do concreto, medida no canteiro em kg/m^3 ;

γ_c = massa específica do cimento, em kg/dm^3 ;

γ_a = massa específica do agregado miúdo, em kg/dm^3 ;

γ_p = massa específica do agregado graúdo, em kg/dm^3 ;

ar = teor de ar incorporado e/ou aprisionado por metro cúbico, em dm^3/m^3 ;

A = consumo de água potável por metro cúbico de concreto adensado, em kg/m^3 ;

C_u = custo do concreto por metro cúbico;

$\$c$ = custo do kg de cimento;

$\$a$ = custo do kg de agregado miúdo;

$\$p$ = custo do kg de agregado graúdo;

$\$ag$ = custo do litro de água potável;

Helene (1987) estudou diversos tipos de cimento Portland existentes na época e chegou em correlações de resistências mecânicas para várias idades, que podem servir como aproximações para auxiliar o profissional que não possa esperar o tempo de estudo. A figura 25 mostra a correlação para o cimento Portland pozolânico CP-32, similar ao CP-IV, cujo o eixo da abscissa está na escala logarítima para transformar a curva em uma reta, para melhor visualização. Para outros tipos de cimento, deve-se consultar a bibliografia citada. Mas faz-se uma ressalva para este atalho: as normas brasileiras de cimentos Portland comum **NBR 5732** (ABNT, 1991a), cimento Portland de alta resistência inicial **NBR 5733** (ABNT, 1991b), cimento Portland pozolânico **NBR 5736** (ABNT, 1991d), cimento Portland alto forno **NBR 5735** (ABNT, 1991c), cimento Portland composto **NBR 11578** (ABNT, 1991e), cimento Portland resistente a sulfatos **NBR 5737** (ABNT, 1992), cimento Portland branco **NBR 12989**

(ABNT, 1993) e cimento Portland de baixo calor de hidratação **NBR 13116** (ABNT, 1991f) podem especificar intervalos amplos de quantidades de adições permitidas para cada tipo destes materiais, assim pode-se encontrar composições distintas ao se trocar o fabricante, a época ou até mesmo o lote. Logo, correlações encontradas em uma determinada época, com um determinado lote, podem diferir com outras atuais, causando dificuldades no procedimento.

O estudo de dosagem deve ser definido em função de parâmetros adotados, que estão listados na tabela 22, e para qualquer alteração nas informações iniciais é necessário que se faça um novo estudo.

Após a obtenção destas características iniciais, se faz o estudo experimental, onde são necessários pelo menos três pontos para o desenho do modelo de comportamento, conforme figura 26, onde se relacionam, para uma determinada trabalhabilidade, resistência à compressão, relação a/c, proporção dos agregados e consumo de cimento. Os três pontos são o intermediário, o pobre e o rico, que são, respectivamente, o 1:5, o 1:6,5 e o 1:3,5, para os concretos convencionais compreendidos em uma faixa de resistência à compressão aproximada de 20 a 50 MPa. O primeiro traço a ser rodado é o 1:5 (cimento: agregados secos totais, em massa) de onde se tiram informações importantes para os traços subseqüentes. É importante frisar que estes três pontos devem abranger toda a faixa de valores requeridas, de forma que se evite extrapolações.

Uma das etapas mais importantes do método IPT é a determinação do teor de argamassa seca, pois esta define as características básicas de um concreto. Se o teor de argamassa estiver elevado, aumenta o custo do material por metro cúbico, assim como a probabilidade da ocorrência de futuras manifestações patológicas, como a fissuração por dessecação superficial e/ou por elevado calor de hidratação do cimento. Por outro lado, se houver quantidade de argamassa insuficiente, a trabalhabilidade do concreto será prejudicada, afetando o acabamento final e provocando porosidade e falhas de concretagem. Por tanto, deve-se sempre buscar o teor de argamassa ideal, para que não ocorram problemas em nenhuma parte.

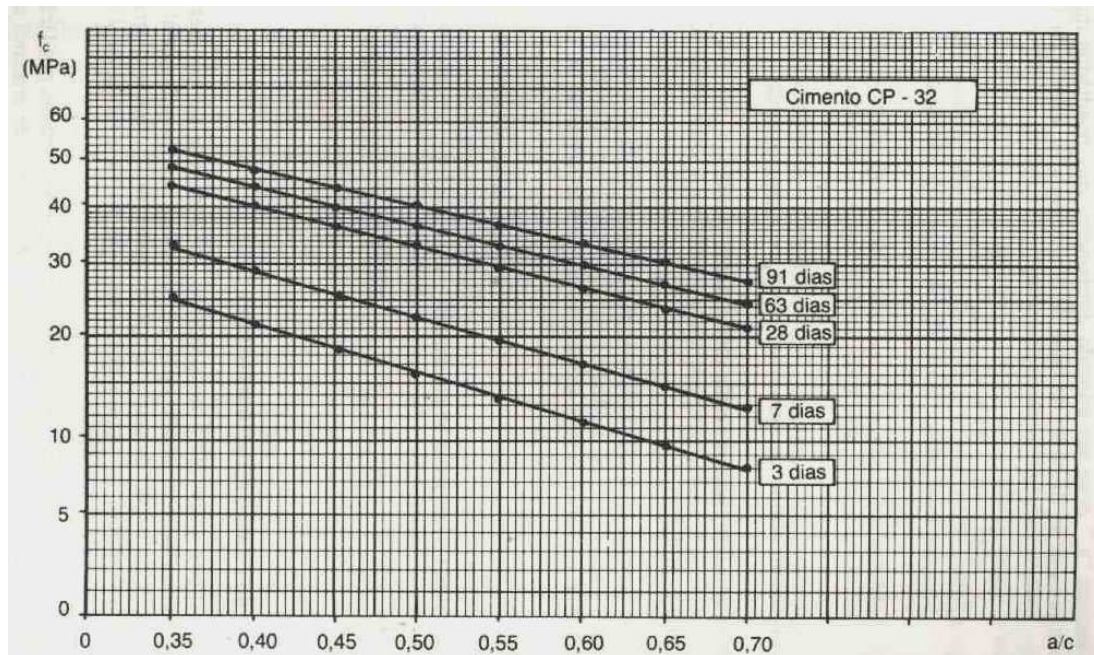


Figura 25: curvas médias de correlação entre resistências à compressão e relação água/cimento para cimento Portland pozolânico CP32 (fonte: HELENE e TERZIAN, 1992, p.238)

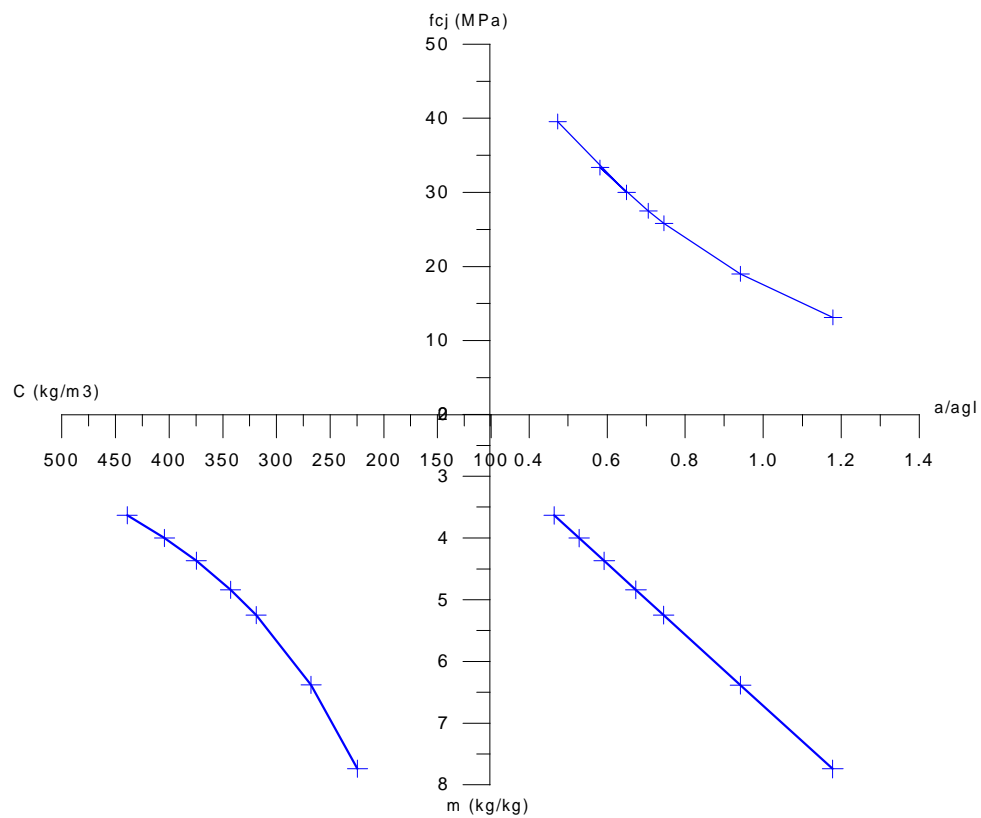


Figura 26: diagrama de dosagem ou modelo de comportamento

Tabela 22: resumo das características básicas para o estudo de dosagem

Itens		Definições	
1- Número da dosagem			
2- f_{ck} (projeto) – MPa			
3- Elementos estruturais em que o concreto será aplicado			
4- Espaçamento entre barras de aço			
5- Dimensão máxima característica do agregado graúdo adotado (mm)			
6- Abatimento adotado (mm)			
7- Cimento; marca, tipo e classe			
8- Relação água/cimento (em função da durabilidade da estrutura)			
9- Desvio-padrão de dosagem (MPa)			
10- Resistência de dosagem (MPa)			
11- Relação água/cimento (em função da resistência de dosagem)			
12- Aditivos; marca, tipo e proporção			
13- Idade de ruptura dos corpos-de-prova (dias)			
14- Estimativa de perda de argamassa no sistema de transporte e lançamento do concreto (%)			
15- Traço (1:m) para a primeira mistura experimental (kg/kg)		1:5,0	
Obra:		Data:	

(fonte: HELENE e TERZIAN, 1992, p.243)

A tabela 23, Helene e Terzian (1992, p.245), descreve uma forma prática de determinação do teor ideal de argamassa seca. O profissional que utilizar esta tabela precisa possuir uma certa experiência, uma vez que se deve começar com um concreto pobre em argamassa e ir adicionando argamassa (cimento e agregado miúdo), até que, visualmente, se perceba que o concreto está com material suficiente para se realizar um bom acabamento final. Logicamente que não é necessário que o início seja em 35% e vá se adicionando de 2% em 2%, pode-se começar em um teor em que se acredita que é pouco abaixo do ideal ou ir somando argamassa em intervalos maiores, apenas com o cuidado de respeitar sempre a coluna de acréscimos, mantendo constante a quantidade do agregado graúdo.

Tabela 23: determinação do teor de argamassa seca para o traço 1:5
(brita = 30 kg)

Teor de Argamassa (%)	Traço Unitário (1:a:p)	Quantidade de Areia (kg)		Quantidade de Cimento (kg)	
		Massa Total	Acréscimo	Massa Total	Acréscimo
35	1:1,10:3,90	8,46	1,22	7,69	0,25
37	1:1,22:3,78	9,68	1,31	7,94	0,26
39	1:1,34:3,66	10,99	1,37	8,20	0,27
41	1:1,46:3,54	12,36	1,50	8,47	0,30
43	1:1,58:3,42	13,86	1,59	8,77	0,32
45	1:1,70:3,30	15,45	1,72	9,09	0,34
47	1:1,82:3,18	17,17	1,85	9,43	0,37
49	1:1,94:3,06	19,02	2,00	9,80	0,40
51	1:2,06:2,94	21,02	2,17	10,20	0,44
53	1:2,18:2,82	23,19	2,36	10,64	0,47
55	1:2,30:2,70	25,55	2,59	11,11	0,52
57	1:2,42:2,58	28,14	2,84	11,63	0,57
59	1:2,54:2,46	30,98	3,12	12,20	0,62
61	1:2,66:2,34	34,10	3,47	12,82	0,69
63	1:2,78:2,22	37,57	3,86	13,51	0,78
65	1:2,90:2,10	41,43		14,29	

(fonte: Helene e Terzian, 1992, p.245)

O método descreve algumas etapas que devem ser seguidas para que ocorra o menor número possível de variações entre diferentes centros de pesquisas ou canteiro de obras:

- a) imprimação do misturador com uma porção de concreto de volume inferior a 6kg com traço 1:2:3 e $a/c = 0,65$. Deixar o material sair livremente;
- b) colocação dos materiais, sendo primeiro parte da água (80%), agregado graúdo, agregado miúdo, cimento, restante da água e, se for o caso, aditivos;
- c) colocação da primeira quantidade de material e verificação do aspecto. Se não estiver com o teor ideal, acrescentar cimento e areia de acordo com a coluna de acréscimos, deixando a quantidade de agregado graúdo constante. Cada porção de material deve ser misturado por 5 minutos;
- d) realização de testes práticos para a confirmação do teor final de argamassa (figura 27);
- e) correção do teor final devido a perdas inerentes ao processo, como transporte e lançamento. As perdas são estimadas entre 2% e 4%;
- f) realizar uma nova mistura de traço 1:5 para a determinação de todas as características finais do concreto fresco: relação água/cimento, consumo por metro cúbico dos componentes, massa específica do concreto fresco e abatimento do tronco de cone.

Após a obtenção de todos os parâmetros necessários para a produção do concreto, é necessário que se produzam os traços auxiliares, um pobre e um rico. Deve-se escolher uma faixa que possivelmente abranja a resistência procurada, pois não é recomendável a extrapolação da curva de dosagem, a não ser que para variações de menos de 10%. Pode-se utilizar os traços 1:3,5 e 1:6,5, espaçados 1,5 para cima e para baixo do traço intermediário, a faixa do abatimento do tronco de cone e o teor de argamassa devem ser mantidos constantes e o cálculo dos traços é semelhante ao feito anteriormente, com a vantagem que, com o teor de argamassa e o traço 'm' já determinados, a quantidade de agregado miúdo e graúdo é obtida pelas duas equações com duas incógnitas já citadas:

$$\alpha = \frac{(1 + a)}{(1 + m)} \quad (\text{eq. 23})$$

$$m = a + p \quad (\text{eq. 24})$$



Figura 27: aspecto do concreto com teor ideal de argamassa seca
(fonte: HELENE e TERZIAN, 1992, p.257)

Novamente realizar as misturas experimentais com o traço rico e pobre e determinar todas as características finais do concreto fresco. O método IPT/EPUSP ainda prevê que, caso o intervalo de abrangência do estudo não chegue no ponto esperado, pode-se realizar traços chamados de muito rico e muito pobre variando 0,5 pontos para cima e para baixo dos traços extremos. Com todos os novos dados obtidos, pode-se calcular as novas constantes 'k', através das equações já descritas.

Após o rompimento dos corpos-de-prova nas idades de projeto, desenha-se o diagrama de dosagem como na figura 26 e pode-se calcular qualquer traço intermediário àquela família, desde que sejam utilizados sempre os mesmos materiais do estudo prévio. É importante salientar que o proporcionamento de materiais de um determinado concreto feito em laboratório é sempre uma tentativa de se chegar mais perto possível da realidade, porém sempre será necessário que se façam correções e ajustes posteriores, para a obtenção do traço final.

4.3 DESENVOLVIMENTO DO MÉTODO DE DOSAGEM PARA CAA

4.3.1 Introdução

Será sempre difícil desenvolver um método teórico de dosagem, que possa ser utilizado universalmente com qualquer combinação de cimento Portland, materiais cimentícios suplementares, quaisquer agregados e quaisquer aditivos, já que os critérios de aceitação destes materiais, apesar de serem normalizados, são amplos demais (AİTCIN, 2000, p.243). Ao citar esta frase, Aİtcin estava se referindo aos concretos convencionais, ou seja, a situação se agrava com concretos auto-adensáveis, onde o uso de aditivos é praticamente obrigatório, além de componentes finos. Mas, a intenção deste método de dosagem é exatamente este: dosar CAA com quaisquer materiais disponíveis, apenas cumprindo requisitos básicos e seguindo um método detalhado.

A obtenção deste concreto não é muito simples, já que é necessário uma combinação adequada entre os materiais, havendo muita sensibilidade à variação de qualquer um deles (ARAÚJO *et al.*, 2003, p.2).

4.3.2 Materiais constituintes

Dependendo das características que se pretende alcançar, deve ser escolhido o tipo de cimento entre os diversos existentes comercialmente na região do estudo. Cada tipo de cimento pode ter vantagens e desvantagens para o fim a que se destina, mas o importante é que se conheça as variações e as peculiaridades de cada local de uso, para que se possa escolher o ideal entre o cimento Portland comum, cimento Portland composto, cimento Portland de alto-forno, cimento Portland pozolânico, cimento Portland de alta resistência inicial, cimento Portland branco, cimento Portland resistente a sulfatos e cimento Portland de baixo calor de hidratação. Mas um cuidado que se deve ter, é que as normas técnicas nacionais destes cimentos (já citadas) podem permitir um grande intervalo de adições, fazendo com que um tipo de cimento possa variar bastante sua composição em diferentes indústrias, épocas ou até mesmo lotes.

Os agregados constituem um componente importante, contribuindo com cerca de 80% da massa e 20% do custo de concreto estrutural sem aditivos, de f_{ck} da ordem de 15 MPa

(ALBUQUERQUE, 2003, p.104). Os agregados miúdos e graúdos devem ser inertes e de conhecida apreciação petrográfica. Os agregados devem ter a menor granulometria possível, sendo interessante utilizar curvas granulométricas contínuas, que ajudaria na compacidade e resistência final do concreto. A dimensão máxima característica do agregado graúdo, determinada pela **NBR NM 248** (ABNT, 2003c), deve ser limitada pela pior seção a qual o CAA fluirá na peça a ser concretada, apesar de que agregados maiores são mais econômicos, enquanto menores são mais apropriados para a mistura. A dosagem deve ser calculada para os materiais secos e em massa, mas caso isto não ocorra, devem ser determinadas as massas unitárias dos agregados através da **NBR 7251** (ABNT, 1982) e coeficiente de inchamento para a areia, através da **NBR 6467** (ABNT, 1987), pra que sejam realizadas as devidas correções. Também é recomendado que o agregado graúdo tenha forma angular e superfície áspera, proporcionando maior aderência entre pasta e agregado (TORRALES-CARBONARI *et al.*, 2003, p.4). Também é recomendável que o agregado graúdo tenha um coeficiente de forma o mais próximo possível de 1, o que diminui os vazios a serem preenchidos com argamassa entre as partículas.

Os materiais finos podem ser diversos, e devem ser escolhidos após uma análise técnica e econômica, pois existem vários materiais que são resíduos de indústrias, de mais baixo custo e que teriam de ser tratados respeitando legislações ambientais. Os finos podem ser pozolânicos, como cinza de casca de arroz, sílica ativa, metacaulim, escória 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. Se os materiais forem pozolânicos, substituirão o cimento, em massa, e se forem não pozolânicos, substituirão o agregado miúdo. E como são responsáveis pela coesão do CAA, os componentes finos deverão possuir uma área superficial maior que a dos materiais substituídos. Por isso, EFNARC (2002, p.5) define como finos, partículas menores que 0,125 mm, incluindo as dos agregados. Mas, além de responsáveis pela resistência à segregação da mistura, os finos desempenham um papel importante para a durabilidade do concreto, tanto física quanto quimicamente. Como as partículas são de tamanho pequeno, elas realizam um efeito fíler, pois fecham poros e melhoram inclusive a zona de transição, que seria o local onde agentes agressivos penetrariam no concreto e onde provavelmente romperia o material no seu limite de carga. E caso as adições fossem pozolânicas, elas reagiriam com o Ca(OH)_2 resultante da

hidratação do cimento, que é um composto frágil e facilmente lixiviável, aumentando novamente a durabilidade do concreto.

Um recente avanço na tecnologia do CAA, segundo Collepardi (2003, p.6), é a nanosílica, ou sílica coloidal amorfa ultra fina, que são partículas de 5-50nm de sílica ativa, disponíveis em solução (10-50% de sólidos). Servem para reduzir exsudação e aumentar a resistência à segregação, pois são componentes extremamente finos. Sua dosagem é entre 3 e 5% da massa dos aglomerantes.

Os aditivos utilizados no CAA são o superplastificante, responsável pela fluidez do concreto, e, ocasionalmente, o modificador de viscosidade, responsável pela coesão da mistura, quando na ausência de componentes finos economicamente ou tecnicamente viáveis. Os aditivos superplastificantes podem ser divididos em quatro grupos (HARTMANN, 2002, p.15); (AİTCIN *et al.*, 1994, p.45):

- a) lignossulfonatos ou lignossulfonatos modificados (LS);
- b) sais sulfonatos de policondensado de naftaleno e formaldeído, usualmente denominados de naftaleno sulfonato ou apenas de naftaleno (NS);
- c) sais sulfonatos de policondensado de melamina e formaldeído, usualmente denominados de melamina sulfonato ou apenas de melamina (MS);
- d) policarboxilatos (PC).

Os lignossulfonatos (LS) são conhecidos como aditivos plastificantes de primeira geração e utilizados como redutores de água normais e em alguns casos também como superplastificantes. O naftaleno (NS) e a melamina (MS) são conhecidos comercialmente como aditivos superplastificantes de 2º geração e permitem a redução em até 25% a quantidade de água na mistura, quando usados como redutores de água. E, finalmente, os policarboxilatos (PC) são os aditivos mais aconselhados para a utilização no CAA, por serem aditivos superplastificantes de alta eficiência ou ainda hiperplastificantes, que dispersam e desfloculam as partículas de cimento, permitem a redução da água das misturas em até 40%, mantendo a mesma trabalhabilidade e são poliméricos (HARTMANN, 2002, p.19); (SAKAI *et al.*, 2003, p.16). Segundo Aİtcin *et al.* (1994, p.47) e Sakai *et al.* (2003, p.17), os aditivos

superplastificantes também podem exercer outras funções ou mecanismos além das já citadas, que auxiliam na fluidez da mistura, como:

- a) redução da tensão superficial da água;
- b) repulsão eletrostática entre partículas;
- c) filme lubrificador entre as partículas de cimento;
- d) dispersão dos grãos de cimento;
- e) inibição da hidratação superficial do cimento, deixando mais água livre para fluidificar o concreto;
- f) mudança da morfologia dos produtos da hidratação;

Pode-se citar um novo tipo de aditivo superplastificante desenvolvido recentemente, o aditivo superplastificante sintético (BURY e CHRISTENSEN, 2002), que possui as mesmas funções dos policarboxilatos, porém com desempenho melhorado.

Já os aditivos modificadores de viscosidade (VMA) são polímeros derivados da celulose e acrílico, solúveis em água, que aumentam a viscosidade e a estabilidade do concreto (LACHEMI *et al.*, 2003). Normalmente, este aditivo reduz o risco de separação de constituintes heterogêneos durante o transporte, o adensamento e assentamento da mistura, até que se inicie o endurecimento do material (KHAYAT e GHEZAL, 2003, p.369). O VMA substitui componentes finos do concreto, assim a mistura contém poucas partículas pequenas, fazendo com que diminua a área superficial do material e, conseqüentemente, o consumo de água. Ou seja, concretos similares podem ter relação a/agl menores ou a mesma relação, porém com maior fluidez, sem que ocorra a segregação. Peterssen (1999, p.6) salienta que o uso do VMA retarda o crescimento da resistência à compressão do CAA com fíler calcáreo, principalmente nas primeiras idades.

Troli *et al.* (2003, p.103) descrevem uma aplicação do aditivo modificador de viscosidade. Este foi utilizado no traço de um CAA em uma estrutura massiva, devido à redução do consumo de cimento. Em estruturas massivas, o consumo de cimento deve ser o menor possível, para reduzir o risco de fissuras térmicas. Assim o VMA teve de ser usado para dar coesão ao CAA.

4.3.3 Procedimento

Como já descrito, o concreto auto-adensável é uma evolução do concreto convencional. Para dosá-lo parte-se dos quatro componentes básicos: cimentos, agregados miúdo e graúdo e água. Após adiciona-se os outros dois, aditivos e finos. Assim como no método IPT/EPUSP para concretos convencionais, este procedimento é baseado em passos para que se possa moldar pelo menos três traços de concreto da mesma família, para então, se obter o diagrama de dosagem.

Na figura 28 observam-se os passos, onde o primeiro é escolher os materiais que tem condições de compor o melhor concreto auto-adensável. As características a serem analisadas são o custo de cada componente, a disponibilidade destes em quantidade e distâncias aceitáveis, e se ainda houver mais de uma opção para um dado item, é aconselhável que se privilegie aqueles com que o responsável pela dosagem já tenha trabalhado. Deve-se especificar o diâmetro máximo do agregado graúdo, o menor entre 20mm ou um terço do espaçamento entre as armaduras da estrutura real em que o CAA será aplicado. Os componentes finos, necessários para garantir a coesão do concreto auto-adensável, devem ser cuidadosamente escolhidos, pois atualmente há boas opções, e muitas, inclusive, são resíduos de indústrias.

O segundo passo é a determinação experimental do teor de argamassa, auxiliado pela equação 23 do método IPT/EPUSP com os materiais escolhidos, sem aditivos nem finos, sendo que esta deve ser mantida constante até o fim da dosagem do CAA. Se o fino escolhido para a substituição for um não pozolânico, deve-se utilizar as equações de 29-37 para a determinação de parâmetros para compor o traço e, após a colocação dos finos e aditivos, o desenho da curva de dosagem. E se o componente fino escolhido for pozolânico, deve-se utilizar as equações 38-48 para se determinar as informações necessárias para o cálculo do traço e, após, o desenho da curva de dosagem.

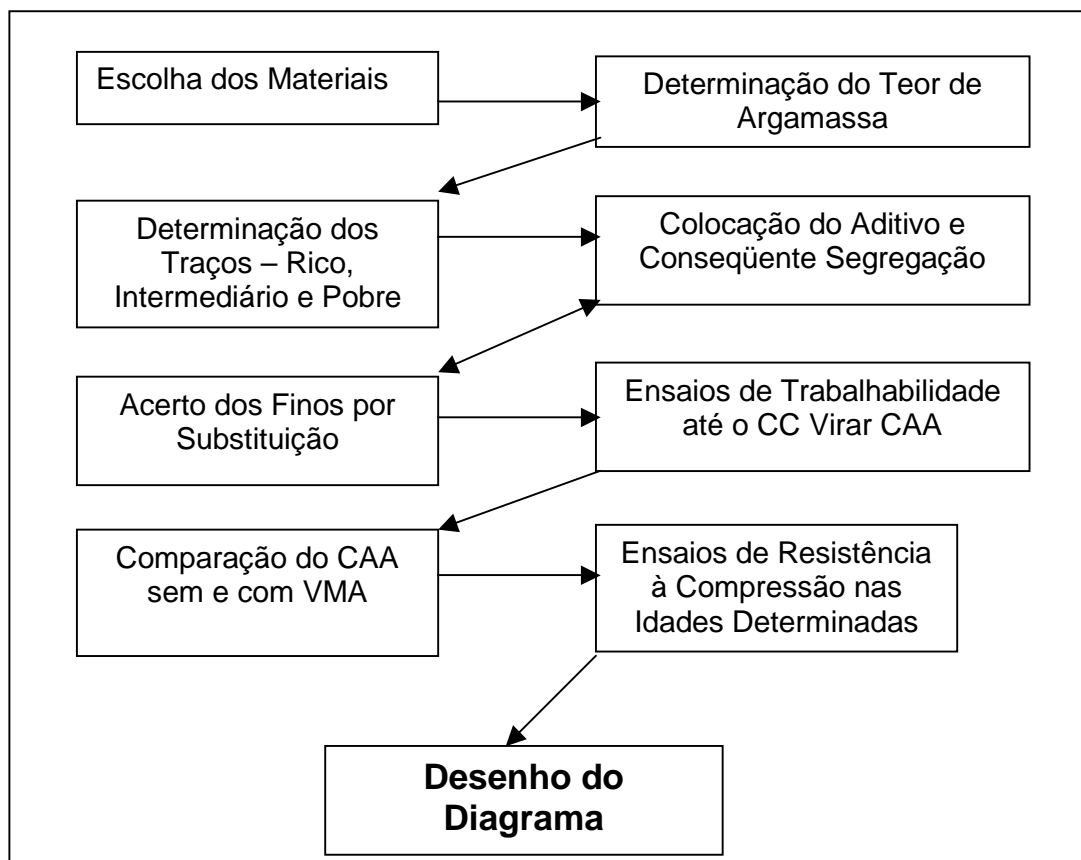


Figura 28: passo-a-passo para dosagem do CAA

a) Fino não pozolânico:

$$fcj = \frac{k_1}{k_2^{a/c}} \quad (\text{eq. 29})$$

$$m = k_3 + k_4 * a / c \quad (\text{eq. 30})$$

$$C = \frac{1000}{k_5 + k_6 * a / c} \quad (\text{eq. 31})$$

$$\alpha = \frac{(1 + f + a)}{(1 + m)} \quad (\text{eq. 32})$$

$$m = a + p + f \quad (\text{eq. 33})$$

$$C = \frac{\gamma}{(1 + f + a + p + a / c)} \quad (\text{eq. 34})$$

$$C = \frac{(1000 - ar)}{\left(\frac{1}{\gamma_c} + \frac{f}{\gamma_f} + \frac{a}{\gamma_a} + \frac{p}{\gamma_p} + a/c \right)} \quad (\text{eq. 35})$$

$$A = C * a/c \quad (\text{eq. 36})$$

$$Cu = C * \$c + C * f * \$f + C * a * \$a + C * p * \$p + C * SP\% * \$sp + C * MV\% * \$vma + C * a/c * \$ag \quad (\text{eq. 37})$$

b) Fino pozolânico:

$$fcj = \frac{k_1}{\left(k_2^{a/agl} \right)} \quad (\text{eq. 38})$$

$$m = k_3 + k_4 * a/agl \quad (\text{eq. 39})$$

$$MC = \frac{1000}{\left(k_5 + k_6 * a/agl \right)} \quad (\text{eq. 40})$$

$$\alpha = \frac{(1 + a)}{(1 + m)} \quad (\text{eq. 41})$$

$$m = a + p \quad (\text{eq. 42})$$

$$MC = \frac{\gamma}{\left(1 + a + p + a/agl \right)} \quad (\text{eq. 43})$$

$$MC = \frac{(1000 - ar)}{\left(\frac{c}{\gamma_c} + \frac{fp}{\gamma_{fp}} + \frac{a}{\gamma_a} + \frac{p}{\gamma_p} + a/agl \right)} \quad (\text{eq. 44})$$

$$C = MC * C\% \quad (\text{eq. 45})$$

$$FP = 1 - C \quad (\text{eq. 46})$$

$$A = MC * a/agl \quad (\text{eq. 47})$$

$$Cu = C * \$c + C * fp * \$fp + C * a * \$a + C * p * \$p + C * SP\% * \$sp + C * MV\% * \$vma + C * a/agl * \$ag \quad (\text{eq. 48})$$

onde:

fcj = resistência à compressão axial, à idade j, em MPa;

a/agl = relação água / aglomerante em massa, em kg/kg;

c = relação cimento / aglomerantes em massa, em kg/kg;

fp = relação fino pozolânico / aglomerantes em massa, em kg/kg;

f = relação fino não pozolânico / aglomerantes em massa, em kg/kg;

a = relação agregado miúdo seco / aglomerantes em massa, em kg/kg;

p = relação agregado graúdo seco / aglomerantes em massa, em kg/kg;

m = relação agregados secos / aglomerantes em massa, em kg/kg;

α = teor de argamassa seca, deve ser constante para uma determinada situação, em kg/kg;

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

C = consumo de cimento por metro cúbico de concreto adensado, em kg/m³;

MC = consumo de material aglomerante por metro cúbico de concreto adensado, em kg/m³;

FP = consumo do fino pozolânico por metro cúbico de concreto adensado, em kg/m³;

$SP\%$ = dosagem de aditivo superplastificante por metro cúbico de concreto adensado, em l/m³;

$VMA\%$ = dosagem de aditivo modificador de viscosidade por metro cúbico de concreto adensado, em l/m³;

γ = massa específica do concreto, medida no canteiro em kg/m³;

γ_c = massa específica do cimento, em kg/dm³;

γ_{fp} = massa específica dos finos pozolânicos, em kg/dm³;

γ_f = massa específica dos finos não pozolânicos, em kg/dm³;

γ_a = massa específica do agregado miúdo, em kg/dm³;

γ_p = massa específica do agregado graúdo, em kg/dm³;

ar = teor de ar incorporado e/ou aprisionado por metro cúbico, em dm³/m³;

A = consumo de água potável por metro cúbico de concreto adensado, em kg/m³;

Cu = custo do concreto por metro cúbico;

$\$c$ = custo do kg de cimento;

$\$f$ = custo do kg de material fino pozolânico;

$\$f$ = custo do kg de material fino não pozolânico;

$\$a$ = custo do kg de agregado miúdo;

$\$p$ = custo do kg de agregado graúdo;

$\$sp$ = custo do litro de aditivo superplastificante;

$\$vma$ = custo do litro de aditivo modificador de viscosidade;

$\$ag$ = custo do litro de água potável;

O cálculo do consumo dos aglomerantes, para que se determine os outros componentes, deve ser feito através das equações 34 ou 35 se o fino for não pozolânico, e através das equações 43 ou 44 se o fino for pozolânico. Observa-se que para utilizar as equações 35 ou 44, é necessário que se conheça a massa específica dos materiais e que se determine o teor de ar incorporado no concreto, enquanto que para se utilizar a 34 ou a 43, basta medir a massa específica do concreto fresco. Através de ambas as opções deve-se chegar a valores iguais, mas recomenda-se que se utilize a primeira opção, pois esta considera o ar aprisionado do concreto e não precisa fazer ensaios de determinação da massa específica dos materiais.

Nesta fase o concreto ainda é convencional, sem aditivos e sem finos especiais. Os finos serão adicionados ao concreto por substituição em massa, ou seja, será retirada a mesma massa do cimento ou do agregado miúdo, não alterando esta proporção.

Com os materiais definidos e o teor de argamassa determinado, devem ser escolhidos pelo menos três traços bases para o desenho do diagrama, um rico, um intermediário e um pobre, para a realização das curvas de dosagem para esta família de materiais, e, poderá se dosar qualquer concreto desejado com estes materiais. Não é aconselhável que se extrapole esta curva. Logo, é recomendável que se aumente o número de pontos para se ter um grande intervalo de valores ou escolher pontos já próximos dos parâmetros finais, caso seja possível. Deve-se sempre manter o teor de argamassa constante em massa, em todos os traços realizados, para que estes sejam considerados da mesma família, e possam ser plotados no mesmo diagrama de dosagem. Pode haver alguma variação no volume final da argamassa, quando forem utilizados materiais de massa específicas diferente. Mas é imprescindível que não ocorra variações de massa entre as argamassas de traços diferentes, para não comprometer o diagrama de dosagem.

Até o terceiro passo, o método é exatamente igual ao IPT/EPUSP. É no quarto passo que o concreto vai se alterando para ser auto-adensável, primeiramente com a colocação do aditivo superplastificante e, simultaneamente, a de materiais finos. A proporção de aditivo que se coloca é em função da massa do cimento e varia muito, devido à variação de cimentos existentes e, principalmente, à grande variedade de aditivos (marcas, tipos). Recomenda-se, então, que se comece com pequenas quantidades, na ordem de 0,30% da massa de cimento, e vá aumentando, até chegar no ponto ideal. Este valor deve ser mantido constante para todos os traços realizados, para que os concretos sejam da mesma família. 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. Nesta etapa não é necessário realizar os ensaios de trabalhabilidade, pois o material está em uma fase bastante fluida, segregando. A partir daqui é muito importante agilidade no processo, já que os aditivos superplastificantes tem um tempo de trabalho, ou seja, com o passar do tempo, vão perdendo sua ação, e este tempo é, em média, 50 minutos, mas depende muito do tipo, da marca do aditivo e, principalmente, da temperatura ambiente. O quarto e o quinto passo são realizados simultaneamente, ou seja, à medida que se coloca o aditivo, os finos também são adicionados.

O quinto passo é a correção da segregação do concreto, tornando-o coeso e fluido ao mesmo tempo. Com a substituição do cimento ou do agregado miúdo por finos especificados para tornar o concreto coeso, cria-se o concreto auto-adensável, e dependendo do material fino escolhido, muda o componente a ser substituído. Se o material fino escolhido for pozolânico ou cimentante (cinza volante, sílica ativa, metacaulim, escória de alto forno, cinza de casca de arroz), substitui-se o cimento, e se for não pozolânico (pó de brita, filer calcário, cerâmica moída) substitui-se o agregado miúdo, desde que os materiais substituídos tenham uma área superficial menor que seus substitutos. Para auxiliar o responsável pela dosagem do concreto auto-adensável, foi criada uma tabela auxiliar para o acerto da proporção do material fino em relação ao que será substituído (tabela 24), onde a proporção começa pequena e aos poucos vai crescendo, até que o concreto fique dentro dos limites estabelecidos no capítulo da trabalhabilidade dos CAA. A água é adicionada experimentalmente em relação à massa dos aglomerantes, a relação a/agl deve ser a menor possível, para que aumente a durabilidade da estrutura e a resistência dos concretos.

Tabela 24: determinação da proporção entre o material fino e o substituído

TRAÇO UNITÁRIO (c:f:a:b)	CIMENTO (kg)		FINOS (kg)		BRITA (kg)	
	Massa Total	Acréscimo	Massa Total	Acréscimo	Massa Total	Acréscimo
1:0:1,12:1,88	8,93		0,00		16,79	
1:0,1:1,02:1,88	9,80	0,87	0,98	0,98	18,42	1,64
1:0,2:0,92:1,88	10,87	1,07	2,17	1,19	20,44	2,01
1:0,3:0,82:1,88	12,19	1,32	3,66	1,49	22,92	2,48
1:0,4:0,72:1,88	13,89	1,70	5,56	1,90	26,11	3,20
1:0,5:0,62:1,88	16,13	2,24	8,06	2,50	30,32	4,21
1:0,6:0,52:1,88	19,23	3,10	11,54	3,48	36,15	5,83
1:0,7:0,42:1,88	23,81	4,58	16,67	5,13	44,76	8,61
1:0,8:0,32:1,88	31,25	7,44	25,00	8,33	58,75	13,99
1:0,9:0,22:1,88	45,46	14,21	40,91	15,91	85,46	26,71
1:1:0,12:1,88	83,34	37,88	83,34	42,43	156,68	71,21

O sexto passo verifica se o concreto já está ideal ou se ainda são necessárias algumas correções. A medida que acontece a adição de aditivo superplastificante e a substituição de materiais por finos, o concreto vai ficando mais coeso e menos fluido. Assim, cada vez que adiciona-se material fino e tira-se outro componente, é necessário que se realize os ensaios de trabalhabilidade. Caso o concreto se enquadre nos limites, estará pronta a dosagem. Se não se enquadrar, deve-se continuar acertando as proporções. Como os testes que podem ser realizados para a análise do CAA podem ser demorados, deve-se observar visualmente o concreto e só realizar os testes quando estiver na eminência da obtenção do CAA, sob pena de o aditivo perder o efeito.

Segundo Billberg (1999, p.47), existem duas formas principais de manter a estabilidade junto com a fluidez do CAA: adicionando sólidos finos ou adicionando o aditivo modificador de viscosidade (VMA). E como são os materiais finos os responsáveis por dar coesão ao CAA, o VMA pode substituir os finos, mas nem sempre é economicamente vantajoso realizar esta troca. Como já se tem o traço do CAA pronto sem o aditivo modificador de viscosidade, deve-se calcular o custo dos materiais, e após, substituir parte dos finos pelo aditivo e recalculá-lo o custo do concreto. Assim, poderá ser analisado se compensa o uso do VMA. Uma situação em que o uso do aditivo modificador de viscosidade é praticamente obrigatório, é quando não se tem materiais finos disponíveis na região, e se é obrigado a utilizar o cimento como um fino pozolânico, aumentando o custo do concreto e aumentando a possibilidade de

ocorrência de manifestações patológicas. Observa-se que este passo não é obrigatório, serve somente para melhorar o traço já determinado, quando finos para dar a coesão necessária ao concreto não forem disponíveis. Isto porque, para que se efetue a substituição de finos pelo VMA, é necessário que se faça um novo concreto, sendo impossível aproveitar o anterior.

Aqui já se tem os traços prontos e deve-se moldar os corpos-de-prova para a ruptura à compressão nas idades requeridas. Os corpos-de-prova devem ser moldados sem vibração ou compactação interna, o CAA deve simplesmente fluir para o interior das fôrmas. Deve-se moldar no mínimo dois corpos-de-prova de dimensões de 9,5 cm de diâmetro por 19,5 cm de altura, para cada idade de ensaio, deixando o material no interior das fôrmas no primeiro dia, coberto, e realizando cura úmida até as idades escolhidas (normalmente 7 e 28 dias). Ensaia-se o concreto à compressão para a obtenção dos dados que faltavam para o desenho do diagrama e para o cálculo das equações, como valor da resistência à compressão (MPa), que se somam à relação a/agl , traço 'm', espalhamento do concreto do ensaio do *slump flow test* e o consumo de cimento por metro cúbico (kg/m^3).

Então com todos os dados prontos, pode-se, facilmente, desenhar o diagrama de dosagem e determinar as equações de comportamento, e a partir de qualquer condição inicial pode-se dosar o concreto com aqueles materiais escolhidos.

4.3.4 Mistura de agregados graúdos

Pode-se realizar um estudo da mistura dos agregados graúdos, com a finalidade de diminuir o custo do concreto, e esta proporção pode ser obtida de modo prático e simples, como recomenda o método IPT/EPUSP (HELENE e TERZIAN, 1992, p.229) para concretos convencionais. Neste estudo se determina a composição ideal entre duas faixas granulométricas de pedras britadas, através do método da **NBR 7810** (ABNT, 1983). Assim, executa-se algumas misturas com diferentes proporções e a melhor mistura é a que tiver a maior massa unitária, que significa que é a que tem menos vazios para serem preenchidos com argamassa.

4.3.5 Tempo de mistura do CAA

O tempo de mistura do CAA deve ser superior ao do concreto convencional, justificando, assim, um estudo cuidadoso sobre o tema. Devido à presença de finos e aditivo superplastificante, o CAA precisa de mais tempo de mistura, para que estes componentes possam dispersar e agir quimicamente, no caso do aditivo, em todo o concreto. Ensaios práticos, realizados por Rigueira Victor *et al.* (2003), demonstraram que tempos curtos de misturas realmente prejudicam o desempenho do CAA.

5 TRABALHO EXPERIMENTAL

5.1 DESCRIÇÃO DO PROCEDIMENTO

Neste capítulo foram dosados concretos auto-adensáveis a partir do método de dosagem proposto nesta dissertação, com o intuito de comprovar sua eficácia, com materiais disponíveis e economicamente viáveis na cidade de Porto Alegre – RS. Foi dosada uma família referência com concreto convencional para comparações e outras seis com o concreto auto-adensável (CAA) com três finos distintos, sendo em um primeiro momento sem aditivo modificador de viscosidade (VMA) e após com aditivo VMA. Para cada uma das famílias foram determinadas as equações e o diagrama de dosagem, e, posteriormente, foram comparadas algumas propriedades dos concretos, como resistência à compressão e à tração, consumo dos componentes, dosagem dos aditivos, ganhos de resistência e custo. Baseado em ensaios prévios, foram calculados apenas três adições para cada ponto do diagrama, mas caso não houvesse esta facilidade, poderia se realizar várias adições, até que se obtivesse a proporção ideal. Como foram estudados sete famílias, com quatro pontos (1:3; 1:4,5; 1:6; e 1:7,5), quatro idades (3, 7, 28 compressão e tração e 63 dias) e dois corpos-de-prova por idade, foram moldados um total de 280 corpos-de-prova de 9,5 centímetros por 19,5 cm.

5.2 ESCOLHA DOS MATERIAIS

Os materiais foram escolhidos de acordo com requisitos técnicos e econômicos. Como o método permite dosar CAA com quaisquer materiais locais, para este estudo experimental foram escolhidos aqueles que foram os de melhor disponibilidade. O cimento foi o ARI/RS, cimento de alta resistência inicial resistente a sulfatos. Os finos utilizados foram o fíler calcáreo, por ser um fino não pozolânico, o metacaulim, por ser disponível comercialmente e a cinza de casca de arroz, esta última por poder ser uma superpozolana de excelentes características e grande disponibilidade em pólos produtores de arroz, como o estado do Rio Grande do Sul. A análise química dos aglomerantes, a qual foi realizada no LACER (laboratório de cerâmica) da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, está mostrada na

tabela 25. A determinação de perda ao fogo dos aglomerantes foi realizada de acordo com a **NBR NM 18** (ABNT, 2004). Observa-se que os materiais finos são todos resíduos industriais, e ao invés de serem enterrados ou dispostos de outra forma agressiva para o meio ambiente, podem ser utilizadas em substituição a componentes do concreto, o que é bastante interessante e econômico. As massas específicas destes materiais foram determinadas através do ensaio descrito na **NBR NM 23** (ABNT, 2001a) e os resultados estão na tabela 26.

Tabela 25: análise química dos aglomerantes utilizados

ELEMENTO	CIMENTO (%)	MC (%)	CCA (%)
CaO	46,8373	0,051	0,5534
SiO₂	28,4229	60,1481	96,3534
Al₂O₃	7,9507	38,7845	-
MgO	7,5944	-	0,9207
SO₃	6,3814	-	-
Fe₂O₃	1,5692	0,492	-
K₂O	1,244	0,5243	2,1724
Perda ao fogo (%)	3,51	2,49	7,17

O agregado miúdo escolhido foi areia regular extraída de rio. A brita de origem basáltica com dimensão máxima característica de 19 milímetros, foi escolhida como agregado graúdo. As massas específicas e unitárias dos agregados graúdo e miúdo constam na tabela 26, enquanto as análises granulométricas estão na tabela 27. As massas específicas dos agregados graúdo e miúdo foram determinadas através do ensaio descrito na **NBR NM 53** (ABNT, 2003b) – agregado graúdo – Determinação de massa específica, massa específica aparente e absorção de água, e **NBR NM 52** (ABNT, 2003a) – agregado miúdo – Determinação de massa específica e massa específica aparente, respectivamente, enquanto as massas unitárias foram determinadas baseado no ensaio da **NBR 7251** (ABNT, 1982) – agregado em estado solto – Determinação da massa unitária. A composição granulométrica foi feita de acordo com o estabelecido na **NBR NM 248** (ABNT, 2003c) - agregados – Determinação da composição granulométrica. Para estes ensaios, a amostra foi coletada conforme a **NBR NM 26** (ABNT, 2001b) - agregados – Amostragem.

E, por último, foram utilizados aditivos superplastificante de terceira geração base policarboxilatos e modificador de viscosidade. As características destes materiais foram fornecidas pelo fabricante. O superplastificante de terceira geração possui um pH variando

entre 5 e 7, massa específica entre 1,067 e 1,107 kg/dm³ e sólidos entre 38 e 42% (MBT, 2003, p.35). Já o aditivo modificador de viscosidade, é uma solução aquosa de polímeros de alto peso molecular, massa específica variando entre 0,98 e 1,02 kg/dm³ e o pH de 9 a 10,5 (MBT, 2003, p.61).

Tabela 26: massas específicas e unitárias dos materiais utilizados

	Massa Específica (kg/dm³)	Massa Unitária (kg/dm³)
Cimento	2,93	-
Fíler calcáreo	2,81	-
Metacaulim	2,42	-
CCA	194	-
Areia	2,64	1,52
Brita	2,84	1,43

Tabela 27: granulometrias dos agregados graúdo e miúdo utilizados

Aberturas das peneiras (mm)	Agregado Graúdo	Agregado Miúdo
	Quantidade Retida Acumulada (%)	Quantidade Retida Acumulada (%)
# 19,00	0	0
# 12,50	41	0
# 9,50	74	0
# 4,80	97	1
# 2,40	100	5
# 1,20	100	15
# 0,60	100	39
# 0,30	100	82
# 0,15	100	99
Módulo de Finura	6,71	2,41
Dimensão Máxima	19 mm	4,8 mm
Limite Granulométrico	BRITA 1	AREIA MÉDIA

5.3 DETERMINAÇÃO DO TEOR DE ARGAMASSA

A determinação do teor de argamassa foi realizada baseado no método IPT/EPUSP (Helene e Terzian, 1992, p. 245), sem finos e aditivos, ou seja, utilizou-se apenas o cimento, agregados e água. A tabela 28 ilustra as adições utilizadas, partindo de um concreto 1:5 com 50% de argamassa, e obtendo, visualmente, o teor de argamassa seca, em massa, de 53% como sendo o ideal para estes materiais. Este valor deve ser mantido constante para as outras famílias calculadas.

Tabela 28: determinação do teor de argamassa seca do trabalho experimental

Determinação do Teor de Argamassa Seca (1:5)				
Teor	Traço	Cimento (kg)	Areia (kg)	Brita (kg)
50	1:2:3	6,67	13,34	20
51	1:2,06:2,94	6,8	14,01	20
52	1:2,12:2,88	6,94	14,72	20
53	1:2,18:2,82	7,09	15,46	20
54	1:2,24:2,76	7,25	16,23	20
55	1:2,30:2,70	7,41	17,04	20
56	1:2,36:2,64	7,58	17,88	20
Água (g): 3690,9				
Abatimento (mm) = 90 + 10 mm				
a/c = 0,52				

5.4 CÁLCULO DOS TRAÇOS DOS CAA

Após a determinação do teor de argamassa para esta família de materiais, calculou-se os traços para serem utilizados no trabalho experimental. As proporções estão indicadas nas tabelas 29-35, que mostram o concreto referência e os auto-adensáveis com fíler calcáreo, metacaulim e cinza de casca de arroz como finos e com ou sem a presença do aditivo modificador de viscosidade. Para que a curva de dosagem fosse melhor ajustada, foram determinados quatro pontos relativamente espaçados. O aditivo superplastificante foi dosado experimentalmente, onde observou-se que para estes materiais, para alcançar esta fluidez sem segregação do agregado graúdo, a quantidade variou de 0,65% até 0,85% em relação à massa dos aglomerantes. A água foi colocada à medida que havia necessidade, baseado em

resultados do ensaio do *slump flow test*, que indicava a falta de água quando o concreto estava pouco fluido ou a obrigatoriedade de se acrescentar uma adição quando o agregado graúdo estava se separando da argamassa da mistura. Outros ensaios para a medição das propriedades dos CAA não foram realizados, já que estes concretos não serão utilizados em estruturas reais. Observa-se que em cada adição, quando o material fino for não pozzolânico, a proporção do cimento e do agregado graúdo seco em massa ficam constantes, enquanto vão diminuindo os valores do agregado miúdo e aumentando os finos, que devem possuir maior área superficial que a areia. Ou seja, o módulo de finura da mistura vai diminuindo, aumentando, assim, a coesão do concreto. Também observa-se que quando o material fino é pozzolânico ou cimentante, são os agregados que ficam constantes, aumentando assim os finos, e diminuindo a massa do cimento, na mesma quantidade. Novamente, o material acrescentado deve possuir maior área superficial que o retirado (cimento), para que aumente a coesão da mistura.

Para a dosagem dos CAA, deve-se sempre respeitar a proporção em massa aglomerantes:agregados e o teor de argamassa já determinada, para que os concretos sejam considerados da mesma família e possam ser comparados.

Tabela 29: traço seco em massa do concreto referência

Referência (1:3) - $\alpha=53\%$				a/c	0,40
Traço	Cimento (kg)	Areia (kg)	Brita (kg)	Água (kg)	4,24
1:1,12:1,88	10,64	11,91	20,00	Abatimento (mm)	120
Referência (1:4,5) - $\alpha=53\%$				a/c	0,49
Traço	Cimento (kg)	Areia (kg)	Brita (kg)	Água (kg)	3,78
1:1,915:2,585	7,74	14,82	20,00	Abatimento (mm)	110
Referência (1:6) - $\alpha=53\%$				a/c	0,61
Traço	Cimento (kg)	Areia (kg)	Brita (kg)	Água (kg)	3,71
1:2,71:3,29	6,08	16,47	20,00	Abatimento (mm)	100
Referência (1:7,5) - $\alpha=53\%$				a/c	0,77
Traço	Cimento (kg)	Areia (kg)	Brita (kg)	Água (kg)	4,61
1:3,505:3,995	6,01	21,05	24,00	Abatimento (mm)	100

Tabela 30: traço seco em massa do CAA com fíler calcáreo, sem VMA

CAA - FC sem VMA (1:3) - $\alpha=53\%$						
Traço	Cimento (kg)	Fíler C. (kg)	Areia (kg)	Brita (kg)	Água (kg)	6
1:0.5:0.62:1.88	11.29	5.64	7	21.23	Espalhamento (mm)	590
1:0.55:0.57:1.88	12.28	6.75	7	23.09	a/c	0.49
1:0.6:0.52:1.88	13.46	8.08	7	25.31	SP (%)	0.65
CAA - FC sem VMA (1:4,5) - $\alpha=53\%$						
Traço	Cimento (kg)	Fíler C. (kg)	Areia (kg)	Brita (kg)	Água (kg)	6,84
1:0.95:0.965:2.585	8.29	7.87	8	21.43	Espalhamento (mm)	690
1:1.05:0.865:2.585	8.74	10.05	8	22.6	a/c	0.78
1:1.15:0.765:2.585	10.46	12.03	8	27.03	SP (%)	0.65
CAA - FC sem VMA (1:6) - $\alpha=53\%$						
Traço	Cimento (kg)	Fíler C. (kg)	Areia (kg)	Brita (kg)	Água (kg)	5,97
1:1.35:1.36:3.29	7.35	9.93	10	24.19	Espalhamento (mm)	590
1:1.45:1.26:3.29	7.94	11.51	10	26.11	a/c	0.81
1:1.55:1.16:3.29	8.62	13.36	10	28.36	SP (%)	0.65
CAA - FC sem VMA (1:7,5) - $\alpha=53\%$						
Traço	Cimento (kg)	Fíler C. (kg)	Areia (kg)	Brita (kg)	Água (kg)	6,55
1:1.65:1.855:3.995	6.47	10.67	12	25.84	Espalhamento (mm)	580
1:1.75:1.755:3.995	6.84	11.97	12	27.32	a/c	1.01
1:1.85:1.655:3.995	7.25	13.41	12	28.97	SP (%)	0.65

Tabela 31: traço seco em massa do CAA com fíler calcáreo, com VMA

CAA - FC com VMA (1:3) - $\alpha=53\%$						Água (g)	6,02
Traço	Cimento (kg)	Fíler C. (kg)	Areia (kg)	Brita (kg)	Espalhamento (mm)	700	
1:0.3:0.82:1.88	10.97	3.29	9	20.63	a/c	0.41	
1:0.4:0.72:1.88	12.5	5	9	23.5	SP (%)	0.7	
1:0.5:0.62:1.88	14.52	7.26	9	27.29	VMA (%)	1	
CAA - FC com VMA (1:4,5) - $\alpha=53\%$						Água (g)	4,84
Traço	Cimento (kg)	Fíler C. (kg)	Areia (kg)	Brita (kg)	Espalhamento (mm)	740	
1:0.6:1.32:2.58	7.58	4.55	10,00	19,55	a/c	0.59	
1:0.7:1.22:2.58	8.20	5.74	10,00	21,15	SP (%)	0.7	
1:0.8:1.12:2.58	8.93	7.14	10,00	23,04	VMA (%)	1	
CAA - FC com VMA (1:6) - $\alpha=53\%$						Água (g)	5,04
Traço	Cimento (kg)	Fíler C. (kg)	Areia (kg)	Brita (kg)	Espalhamento (mm)	620	
1:1:1.71:3.29	6.43	6.43	11,00	21,16	a/c	0.78	
1:1,1:1,61:3,29	6,83	7,52	11,00	22,48	SP (%)	0,7	
1:1,2:1,51:3,29	7,28	8,74	11,00	23,97	VMA (%)	1	
CAA - FC com VMA (1:7,5) - $\alpha=53\%$						Água (g)	6,12
Traço	Cimento (kg)	Fíler C. (kg)	Areia (kg)	Brita (kg)	Espalhamento (mm)	640	
1:1.4:2.11:3.99	5.45	7.63	11.50	21.75	a/c	1.12	
1:1.5:2.01:3.99	5.72	8.58	11.50	22.83	SP (%)	0.7	
1:1.6:1.91:3.99	6.02	9.63	11.50	24.02	VMA (%)	1	

Tabela 32: traço seco em massa do CAA com metacaulim, sem VMA

CAA - Metacaulim sem VMA (1:3) - $\alpha=53\%$						
Traço	Cimento (kg)	Metacaulim(kg)	Areia (kg)	Brita (kg)	Água (g)	7,1
0.7:0.3:1.12:1.88	7.50	3.21	12.00	20.14	Espalhamento(mm)	570
0.6:0.4:1.12:1.88	7.50	5.00	14.00	23.50	a/agl	0.57
0.5:0.5:1.12:1.88	7.50	7.50	16.80	28.20	SP (%)	0.75
CAA - Metacaulim sem VMA (1:4,5) - $\alpha=53\%$						
Traço	Cimento (kg)	Metacaulim(kg)	Areia (kg)	Brita (kg)	Água (g)	4,74
0.7:0.3:1.915:2.585	5.50	2.36	15.05	20.31	Espalhamento(mm)	640
0.6:0.4:1.915:2.585	5.50	3.67	17.55	23.70	a/agl	0.60
0.5:0.5:1.915:2.585	5.50	5.50	21.07	28.44	SP (%)	0.75
CAA - Metacaulim sem VMA (1:6) - $\alpha=53\%$						
Traço	Cimento (kg)	Metacaulim(kg)	Areia (kg)	Brita (kg)	Água (g)	4,65
0.7:0.3:2.71:3.29	4.00	1.71	15.49	18.80	Espalhamento(mm)	650
0.6:0.4:2.71:3.29	4.00	2.67	18.07	21.93	a/agl	0.81
0.5:0.5:2.71:3.29	4.00	4.00	21.68	26.32	SP (%)	0.75
CAA - Metacaulim sem VMA (1:7,5) - $\alpha=53\%$						
Traço	Cimento (kg)	Metacaulim(kg)	Areia (kg)	Brita (kg)	Água (g)	5,13
0.7:0.3:3.505:3.995	3.50	1.50	17.53	19.98	Espalhamento(mm)	630
0.6:0.4:3.505:3.995	3.50	2.33	20.45	23.30	a/agl	1.03
0.5:0.5:3.505:3.995	3.50	3.50	24.54	27.97	SP (%)	0.75

Tabela 33: traço seco em massa do CAA com metacaulim, com VMA

CAA - Metacaulim com VMA (1:3) - $\alpha=53\%$						Água (g)	6,17
Traço	Cimento (kg)	Metacaulim(kg)	Areia (kg)	Brita (kg)	Espalhamento(mm)	570	
0.85:0.15:1.12:1.88	10.00	1.76	13.18	22.12	a/agl	0.46	
0.75:0.25:1.12:1.88	10.00	3.33	14.93	25.07	SP (%)	0.85	
0.65:0.35:1.12:1.88	10.00	5.38	17.23	28.92	VMA (%)	0.80	
CAA - Metacaulim com VMA (1:4,5) - $\alpha=53\%$						Água (g)	4,88
Traço	Cimento (kg)	Metacaulim(kg)	Areia (kg)	Brita (kg)	Espalhamento(mm)	580	
0.85:0.15:1.915:2.585	6.50	1.15	14.64	19.77	a/agl	0.56	
0.75:0.25:1.915:2.585	6.50	2.17	16.60	22.40	SP (%)	0.85	
0.65:0.35:1.915:2.585	6.50	3.50	19.15	25.85	VMA (%)	0.80	
CAA - Metacaulim com VMA (1:6) - $\alpha=53\%$						Água (g)	5,86
Traço	Cimento (kg)	Metacaulim(kg)	Areia (kg)	Brita (kg)	Espalhamento(mm)	610	
0.85:0.15:2.71:3.29	5.50	0.97	17.54	21.29	a/agl	0.80	
0.75:0.25:2.71:3.29	5.50	1.83	19.87	24.13	SP (%)	0.85	
0.65:0.35:2.71:3.29	5.50	2.96	22.93	27.84	VMA (%)	0.80	
CAA - Metacaulim com VMA (1:7,5) - $\alpha=53\%$						Água (g)	6,2
Traço	Cimento (kg)	Metacaulim(kg)	Areia (kg)	Brita (kg)	Espalhamento(mm)	630	
0.85:0.15:3.505:3.995	4.50	0.79	18.56	21.15	a/agl	1.03	
0.75:0.25:3.505:3.995	4.50	1.50	21.03	23.97	SP (%)	0.85	
0.65:0.35:3.505:3.995	4.50	2.42	24.27	27.66	VMA (%)	0.80	

Tabela 34: traço seco em massa do CAA com cinza de casca de arroz, sem VMA

CAA - Cinza de Casca de Arroz sem VMA (1:3) - $\alpha=53\%$						
Traço	Cimento (kg)	CCA (kg)	Areia (kg)	Brita (kg)	Água (g)	6,03
0,6:0,4:1,12:1,88	6,00	4,00	11,20	18,80	Espalhamento(mm)	665
0,5:0,5:1,12:1,88	6,00	6,00	13,44	22,56	a/agl	0,50
0,4:0,6:1,12:1,88	6,00	9,00	16,80	28,20	SP (%)	0,80
CAA - Cinza de Casca de Arroz sem VMA (1:4,5) - $\alpha=53\%$						
Traço	Cimento (kg)	CCA (kg)	Areia (kg)	Brita (kg)	Água (g)	5,21
0,6:0,4:1,915:2,585	4,50	3,00	14,36	19,39	Espalhamento(mm)	620
0,5:0,5:1,915:2,585	4,50	4,50	17,24	23,27	a/agl	0,58
0,4:0,6:1,915:2,585	4,50	6,75	21,54	29,08	SP (%)	0,80
CAA - Cinza de Casca de Arroz sem VMA (1:6) - $\alpha=53\%$						
Traço	Cimento (kg)	CCA (kg)	Areia (kg)	Brita (kg)	Água (g)	4,94
0,6:0,4:2,71:3,29	3,50	2,33	15,81	19,19	Espalhamento(mm)	640
0,5:0,5:2,71:3,29	3,50	3,50	18,97	23,03	a/agl	0,71
0,4:0,6:2,71:3,29	3,50	5,25	23,71	28,79	SP (%)	0,80
CAA - Cinza de Casca de Arroz sem VMA (1:7,5) - $\alpha=53\%$						
Traço	Cimento (kg)	CCA (kg)	Areia (kg)	Brita (kg)	Água (g)	7,11
0,6:0,4:3,505:3,995	3,00	2,00	17,53	19,98	Espalhamento(mm)	620
0,5:0,5:3,505:3,995	3,00	3,00	21,03	23,97	a/agl	1,19
0,4:0,6:3,505:3,995	3,00	4,50	26,29	29,96	SP (%)	0,80

Tabela 35: traço seco em massa do CAA com cinza de casca de arroz, com VMA

CAA - Cinza de Casca de Arroz com VMA (1:3) - $\alpha=53\%$						Água (g)	6,44
Traço	Cimento (kg)	CCA (kg)	Areia (kg)	Brita (kg)	Espalhamento(mm)	620	
0,85:0,15:1,12:1,88	10,00	1,76	13,18	22,12	a/agl		0,42
0,75:0,25:1,12:1,88	10,00	3,33	14,93	25,07	SP (%)		0,85
0,65:0,35:1,12:1,88	10,00	5,38	17,23	28,92	VMA (%)		0,90
CAA - Cinza de Casca de Arroz com VMA (1:4,5) - $\alpha=53\%$						Água (g)	4,71
Traço	Cimento (kg)	CCA (kg)	Areia (kg)	Brita (kg)	Espalhamento(mm)	600	
0,85:0,15:1,915:2,585	6,50	1,15	14,64	19,77	a/agl		0,47
0,75:0,25:1,915:2,585	6,50	2,17	16,60	22,40	SP (%)		0,85
0,65:0,35:1,915:2,585	6,50	3,50	19,15	25,85	VMA (%)		0,90
CAA - Cinza de Casca de Arroz com VMA (1:6) - $\alpha=53\%$						Água (g)	6,96
Traço	Cimento (kg)	CCA (kg)	Areia (kg)	Brita (kg)	Espalhamento(mm)	600	
0,85:0,15:2,71:3,29	5,50	0,97	17,54	21,29	a/agl		0,82
0,75:0,25:2,71:3,29	5,50	1,83	19,87	24,13	SP (%)		0,85
0,65:0,35:2,71:3,29	5,50	2,96	22,93	27,84	VMA (%)		0,90
CAA - Cinza de Casca de Arroz com VMA (1:7,5) - $\alpha=53\%$						Água (g)	5,82
Traço	Cimento (kg)	CCA (kg)	Areia (kg)	Brita (kg)	Espalhamento(mm)	600	
0,85:0,15:3,505:3,995	4,50	0,79	18,56	21,15	a/agl		0,84
0,75:0,25:3,505:3,995	4,50	1,50	21,03	23,97	SP (%)		0,85
0,65:0,35:3,505:3,995	4,50	2,42	24,27	27,66	VMA (%)		0,90

Os traços finais resumidos estão na tabela 36. Nota-se que o percentual de adições em substituição ao cimento foi elevado, já que foi substituído 30% de metacaulim e 50% de cinza de casca de arroz em massa pelo cimento, nos CAA com estas adições, sem aditivo modificador de viscosidade. O traço indicado equivale à unidade para os aglomerantes.

Também ficou clara a função do aditivo modificador de viscosidade, pois nos concretos com este material, a quantidade de finos caiu bastante. Uma grande vantagem do uso do VMA é a diminuição da relação a/agl das misturas, pois como os finos possuem uma área superficial muito maior que a dos materiais que estão substituindo, demandam mais água, e ao serem trocados pelo VMA, não necessitam de tanta água, diminuindo assim a relação a/agl e, provavelmente, aumentando a durabilidade e as propriedades mecânicas do concreto.

Concretos pobres em argamassa resultam em falhas de concretagem e falta de pasta para o acabamento final da estrutura, prejudicando a estética e a durabilidade, enquanto concretos ricos em argamassa provocam retrações elevadas do concreto, calor de hidratação e aumentam o custo do concreto. Esta definição é muito importante, pois o teor de argamassa seca é quem rege o custo final do concreto, e autores consagrados na área, como Okamura (1997), Su *et al.* (2001) e Gomes (2002) defendem que a argamassa do CAA deve ser superior a dos concretos convencionais. Inclusive, para Domone e Jin (1999, p.110), a quantidade de agregado graúdo do CAA varia de 31-35%, ou seja o teor de argamassa ficará elevado, entre 65-69%.

Observa-se que na tabela 37, a qual apresenta o consumo dos materiais por m^3 , o consumo dos aglomerantes no traço unitário em massa 1:3 está um pouco elevado, na ordem de 530 kg/m^3 . Caso estes concretos fossem utilizados em estruturas reais, os CCA com fíler calcáreo provavelmente apresentariam manifestações patológicas, devido a problemas de dessecação superficial e alto calor de hidratação do concreto, causando fissuras variadas. Este problema poderia ocorrer nestes concretos, pois todo o aglomerante é cimento. Já no caso dos CAA com cinza de casca de arroz e metacaulim, estas manifestações patológicas provavelmente não ocorreriam, pois o consumo do cimento decai significativamente, apesar de que o consumo dos aglomerantes ficar praticamente constante. Isto sem contar o ganho ecológico, pois sabe-se que a produção do cimento é altamente impactante à natureza e não sustentável.

Tabela 36: traços unitários secos em massa dos concretos produzidos

CONCRETOS	TRAÇO	C	MC	CCA	FC	AR	BR	a/agl	SP	VMA
REFERÊNCIA	1:3	1,00				1,17	1,88	0,40		
	1:4,5	1,00				1,92	2,59	0,49		
	1:6	1,00				2,71	3,29	0,61		
	1:7,5	1,00				3,51	4,00	0,77		
CAA FC sem VMA	1:3	1,00			0,55	0,57	1,88	0,49	0,65	
	1:4,5	1,00			1,05	0,87	2,59	0,78	0,65	
	1:6	1,00			1,35	1,36	3,29	0,81	0,65	
	1:7,5	1,00			1,65	1,86	4,00	1,01	0,65	
CAA FC com VMA	1:3	1,00			0,50	0,67	1,88	0,41	0,70	1,00
	1:4,5	1,00			0,70	1,22	2,58	0,59	0,70	1,00
	1:6	1,00			1,00	1,71	3,29	0,78	0,70	1,00
	1:7,5	1,00			1,40	2,11	3,99	1,12	0,70	1,00
CAA MC sem VMA	1:3	0,60	0,40			1,17	1,88	0,57	0,75	
	1:4,5	0,70	0,30			1,92	2,59	0,60	0,75	
	1:6	0,70	0,30			2,71	3,29	0,81	0,75	
	1:7,5	0,70	0,30			3,51	4,00	1,03	0,75	
CAA MC com VMA	1:3	0,75	0,25			1,17	1,88	0,46	0,85	0,80
	1:4,5	0,75	0,25			1,92	2,59	0,56	0,85	0,80
	1:6	0,75	0,25			2,71	3,29	0,80	0,85	0,80
	1:7,5	0,75	0,25			3,51	4,00	1,03	0,85	0,80
CAA CCA sem VMA	1:3	0,50		0,50		1,17	1,88	0,50	0,80	
	1:4,5	0,50		0,50		1,92	2,59	0,58	0,80	
	1:6	0,50		0,50		2,71	3,29	0,71	0,80	
	1:7,5	0,50		0,50		3,51	4,00	1,19	0,80	
CAA CCA com VMA	1:3	0,65		0,35		1,17	1,88	0,47	0,85	0,90
	1:4,5	0,65		0,35		1,92	2,59	0,47	0,85	0,90
	1:6	0,65		0,35		2,71	3,29	0,82	0,85	0,90
	1:7,5	0,65		0,35		3,51	4,00	0,84	0,85	0,90

Legenda: C- cimento; MC- metacaulim; CCA- cinza de casca de arroz; FC- fíler calcáreo; AR- areia; BR- brita; a/agl- relação água/aglomerante, em massa; SP- aditivo superplastificante; VMA- aditivo modificador de viscosidade

Tabela 37: consumo dos materiais (kg/m³) dos concretos produzidos

CONCRETOS	TRAÇO	agl	C	MC	CCA	FC	AR	BR	a/agl	SP	VMA
REFERÊNCIA	1:3	538	538				603	1017	0,40		
	1:4,5	398	398				763	1029	0,49		
	1:6	313	313				848	1030	0,61		
	1:7,5	255	255				895	1020	0,77		
CAA FC sem VMA	1:3	518	518			285	295	974	0,49	3,37	
	1:4,5	361	361			379	312	933	0,78	2,35	
	1:6	298	298			403	406	981	0,81	1,94	
	1:7,5	243	243			402	452	972	1,01	1,58	
CAA FC com VMA	1:3	540	540			270	335	1015	0,41	3,78	4,86
	1:4,5	386	386			270	471	996	0,59	2,70	3,86
	1:6	300	300			300	513	987	0,78	1,95	3,00
	1:7,5	237	237			331	499	944	1,12	1,77	2,13
CAA MC sem VMA	1:3	486	297	194			545	914	0,57	3,65	
	1:4,5	378	265	114			725	978	0,60	2,84	
	1:6	293	205	88			793	963	0,81	2,20	
	1:7,5	238	167	71			835	951	1,03	1,79	
CAA MC com VMA	1:3	517	387	129			579	971	0,46	4,39	4,13
	1:4,5	385	289	96			737	995	0,56	3,27	3,08
	1:6	294	220	73			796	967	0,80	2,50	2,35
	1:7,5	238	179	60			835	952	1,03	2,03	1,91
CAA CCA sem VMA	1:3	489	244		245		548	919	0,50	3,91	
	1:4,5	372	186		186		712	962	0,58	2,98	
	1:6	296	148		148		801	973	0,71	2,37	
	1:7,5	226	113		113		792	903	1,19	1,81	
CAA CCA com VMA	1:3	516	335		181		578	970	0,47	4,38	4,64
	1:4,5	392	255		137		750	1013	0,47	3,33	3,53
	1:6	289	188		101		782	949	0,82	2,45	2,60
	1:7,5	247	161		86		866	987	0,84	2,10	2,22

Legenda: agl- aglomerantes; C- cimento; MC- metacaulim; CCA- cinza de casca de arroz; FC- fíler calcáreo; AR- areia; BR- brita; a/agl- relação água/aglomerante, em massa; SP- aditivo superplastificante; VMA- aditivo modificador de viscosidade

Tabela 38: custo unitário dos materiais / m³ e total dos concretos produzidos (em R\$)

CONCRETOS	TRAÇO	C	MC	CCA	FC	AR	BR	SP	VMA	TOTAL
REFERÊNCIA	1:3	215,32				7,84	20,24			243,40
	1:4,5	159,30				9,91	20,59			189,80
	1:6	125,22				11,03	20,60			156,84
	1:7,5	102,10				11,63	20,39			134,12
CAA FC sem VMA	1:3	207,13			22,78	3,84	19,47	50,40		303,71
	1:4,5	144,42			30,33	4,06	18,67	35,20		232,68
	1:6	119,26			32,20	5,27	19,62	29,07		205,43
	1:7,5	97,36			32,13	5,87	19,45	23,73		178,54
CAA FC com VMA	1:3	215,92			21,59	4,35	20,30	56,68	24,29	343,13
	1:4,5	154,43			21,62	6,12	19,92	40,54	19,30	261,94
	1:6	119,96			23,99	6,67	19,73	29,24	15,00	214,59
	1:7,5	94,65			26,50	6,49	18,88	26,62	10,65	183,79
CAA MC sem VMA	1:3	116,69	116,69			7,08	18,28	54,70		313,44
	1:4,5	105,95	68,11			9,42	19,56	42,57		245,60
	1:6	81,96	52,69			10,31	19,26	32,93		197,15
	1:7,5	66,67	42,86			10,85	19,02	26,79		166,19
CAA MC com VMA	1:3	154,98	77,49			7,52	19,42	65,87	20,66	345,94
	1:4,5	115,42	57,71			9,58	19,89	49,05	15,39	267,05
	1:6	88,16	44,08			10,35	19,34	37,47	11,76	211,16
	1:7,5	71,49	35,75			10,86	19,04	30,38	9,53	177,05
CAA CCA sem VMA	1:3	97,80		12,22		7,12	18,39	58,68		194,21
	1:4,5	74,39		9,30		9,26	19,23	44,64		156,82
	1:6	59,14		7,39		10,42	19,46	35,48		131,89
	1:7,5	45,19		5,65		10,30	18,05	27,11		106,30
CAA CCA com VMA	1:3	134,11		9,03		7,51	19,39	65,76	23,21	259,01
	1:4,5	101,88		6,86		9,75	20,26	49,96	17,63	206,34
	1:6	75,02		5,05		10,16	18,99	36,79	12,98	158,99
	1:7,5	64,21		4,32		11,25	19,73	31,49	11,11	142,12

Legenda: C- cimento; MC- metacaulim; CCA- cinza de casca de arroz; FC- fíler calcáreo; AR- areia; BR- brita; a/agl- relação água/aglomerante, em massa; SP- aditivo superplastificante; VMA- aditivo modificador de viscosidade

O custo dos materiais está ilustrado na tabela 38, onde os valores unitários foram pesquisados no mês de abril de 2004, quando a média ponderal do custo unitário básico do Rio Grande do Sul (CUB-RS) estava em R\$770,00 e o dólar paralelo em R\$2,85. O preço encontrado do cimento ARI-RS foi de 0,40 R\$/kg, o da cinza de casca de arroz foi de 0,10 R\$/kg, o do metacaulim foi de 0,60 R\$/kg, a areia custava 0,013 R\$/kg, o fíler calcáreo 0,08 R\$/kg, a brita de basalto custava R\$0,02 R\$/kg, o aditivo superplastificante usado estava em 15,00 R\$/kg e o aditivo modificador de viscosidade 5,00 R\$/kg. O custo da cinza de casca de arroz foi determinada através de uma estimativa do custo de frete, já que este material não estava disponível comercialmente na época dos ensaios.

Pode-se comparar, através da figura 29, o custo do concreto referência, fixando a proporção entre os aglomerantes e agregados, sem considerar os valores de resistência à compressão. Nota-se que o CAA com fíler calcáreo apresentou um acréscimo de custo de cerca de 25%, o com metacaulim aumentou o custo em cerca de 28%, enquanto o CAA com cinza de casca de arroz teve seu custo 20% inferior ao de referência. O aumento de custo dos dois primeiros CAA se explica pela introdução do aditivo superplastificante, que é um composto de custo elevado, porém necessário para fluidificar a mistura. A queda de valores do CAA com cinza de casca de arroz, apesar do aditivo, deve-se à substituição de 50% do cimento por um produto de menor custo, compensando, inclusive, o aumento da demanda de aditivo. E quando utilizou-se o VMA o custo global, comparando-se com os CAA sem VMA, aumentou em cerca de 10% para os traços 1:3 e 1:4,5, e cerca de 6% para os traços 1:6 e 1:7,5, para os CAA com fíler calcáreo e metacaulim. Quando comparado o CAA com cinza de casca de arroz com e sem VMA, observou-se que o custo do primeiro foi superior em cerca de 30% para todos os traços, como observado na figura 29.

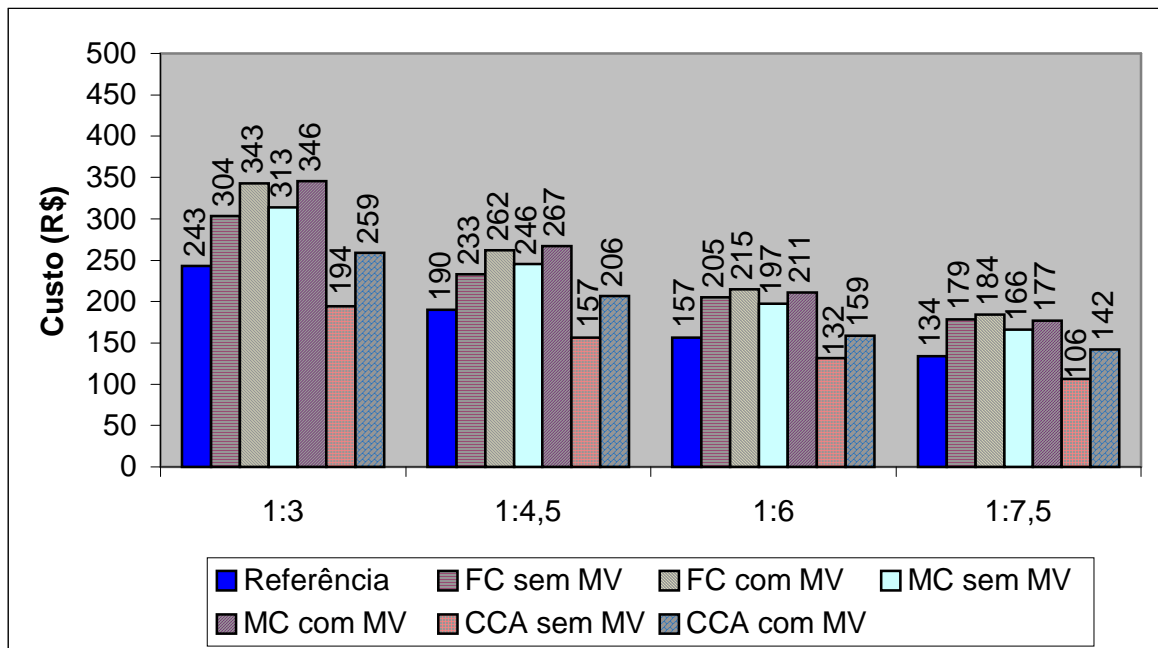


Figura 29 : custos globais dos traços dos CAA e do concreto convencional

5.5 RESULTADOS

5.5.1 Curvas de dosagem

Nas figuras 30 a 36 constam os diagramas de dosagem destes concretos, relacionando resistência à compressão, relação água/aglomerante, traço 'm' e consumo de aglomerantes. Os concretos foram ensaiados à compressão, aos 3, 7, 28 e 63 dias, e à tração, aos 28 dias. O ensaio de resistência à compressão foi realizado de acordo com a **NBR 5739 (ABNT, 1994a)**: concreto – Ensaio de compressão de corpos-de-prova cilíndricos, e o ensaio de resistência à tração seguiu a **NBR 7222 (ABNT, 1994b)**: argamassa e concreto – Determinação da resistência à tração por compressão diametral de corpos-de-prova cilíndricos. Os valores estão na tabela 41.

Através da visualização destas figuras pode-se observar alguns pontos. O CAA com fíler calcáreo com VMA teve um expressivo ganho de resistência dos 7 aos 28 dias, em todos os traços. Não foi encontrada uma explicação razoável para este súbito ganho de resistência, apenas a afirmação, já citada, de Peterssen (1999, p.6), que diz que o uso de aditivos

modificadores de viscosidade pode retardar o crescimento da resistência, embora este autor também não tenha explicado o porquê. Novos ensaios deveriam ser feitos para confirmar ou não este fato. Também observa-se que as resistências à compressão dos CAA com VMA são superiores às dos CAA sem VMA para mesmas proporções '1:m', pois este aditivo substitui finos, diminuindo a relação a/agl, aumentando, assim, os valores de resistência à compressão dos concretos.

Observa-se, na tabela 40, que as relações entre as resistência à compressão e à tração dos CAA são similares às do concreto convencional. Ou seja, baseado nos ensaios realizados para esta dissertação, pode-se afirmar que a resistência à tração nos CAA é influenciada da mesma maneira que a resistência à compressão.

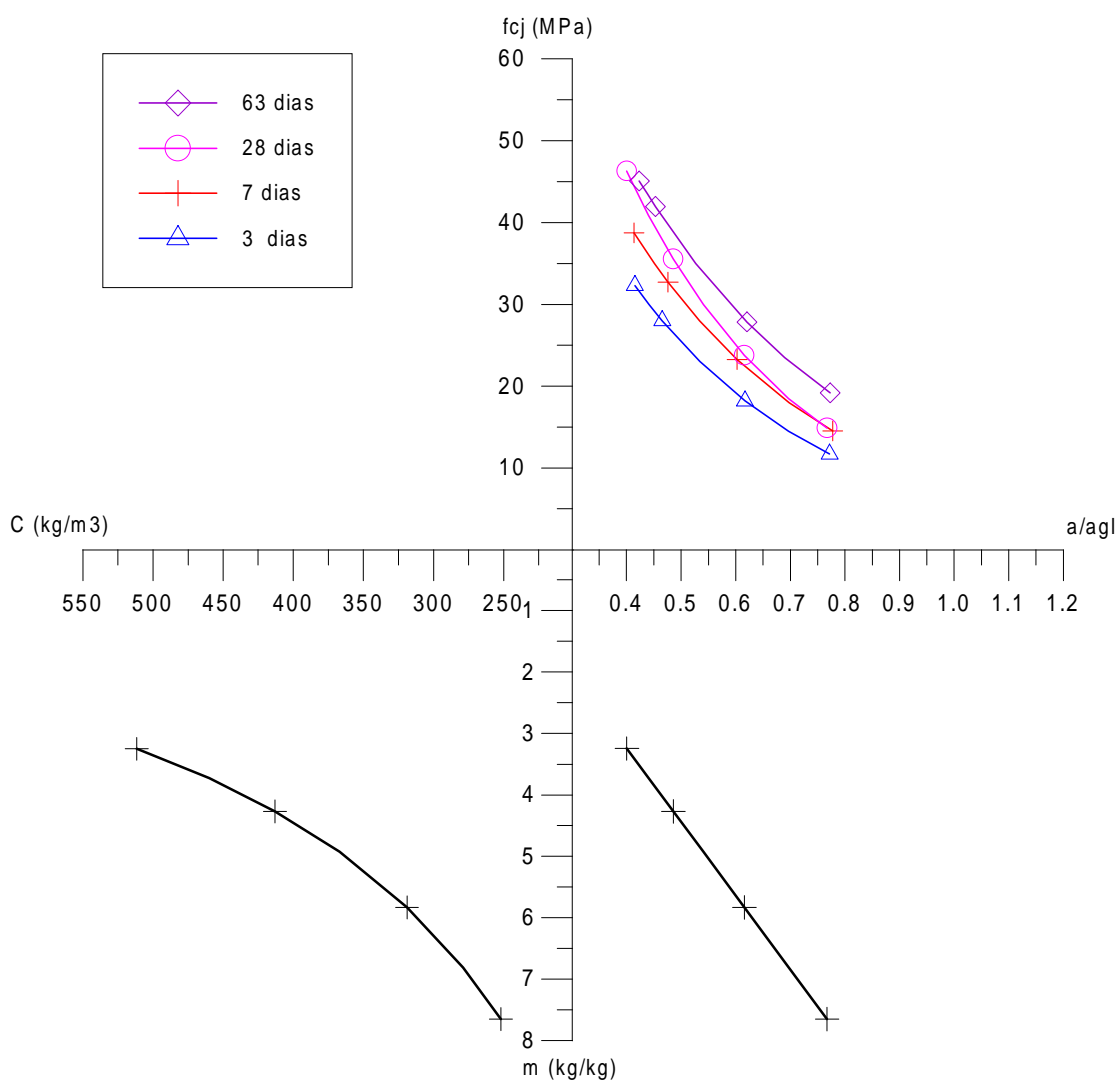


Figura 30: curva de dosagem para o concreto convencional referência

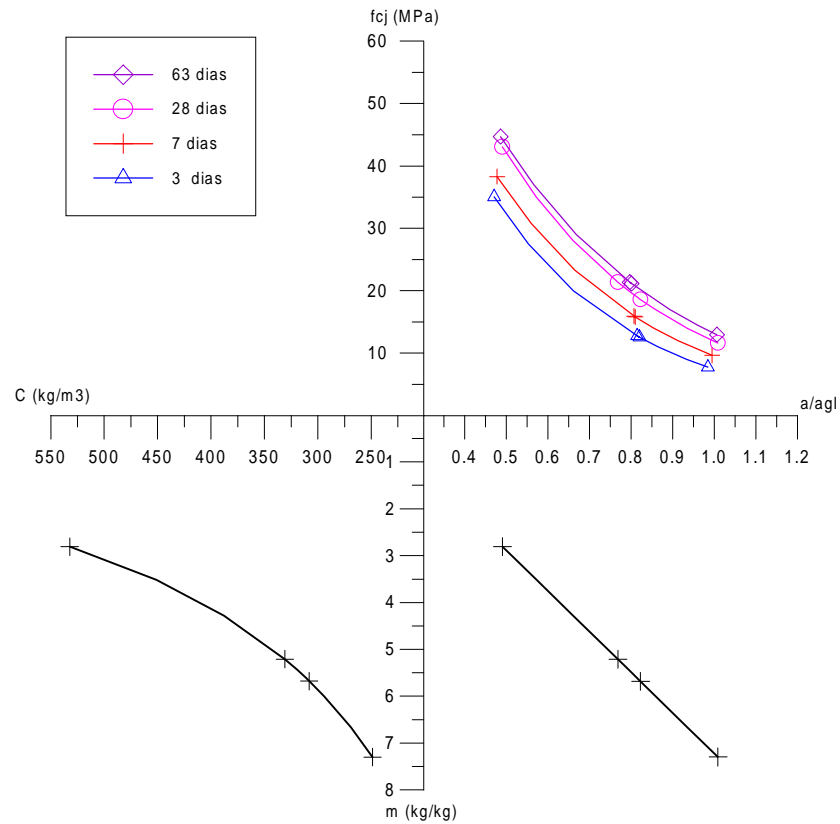


Figura 31: curva de dosagem para o CAA com fíler calcáreo sem VMA

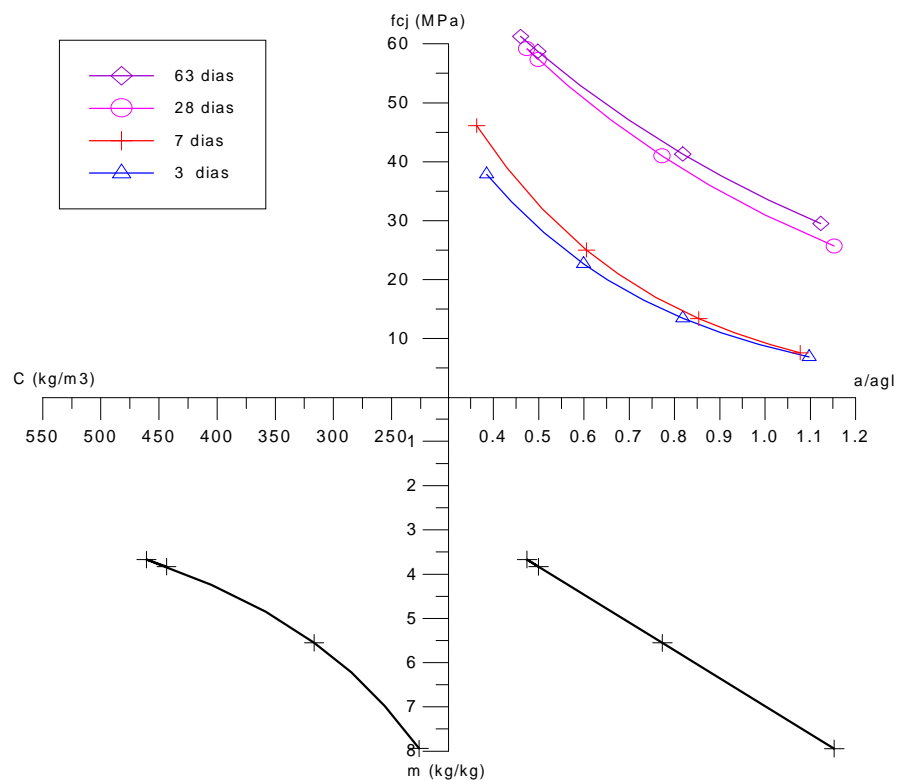


Figura 32: curva de dosagem para o CAA com fíler calcáreo com VMA

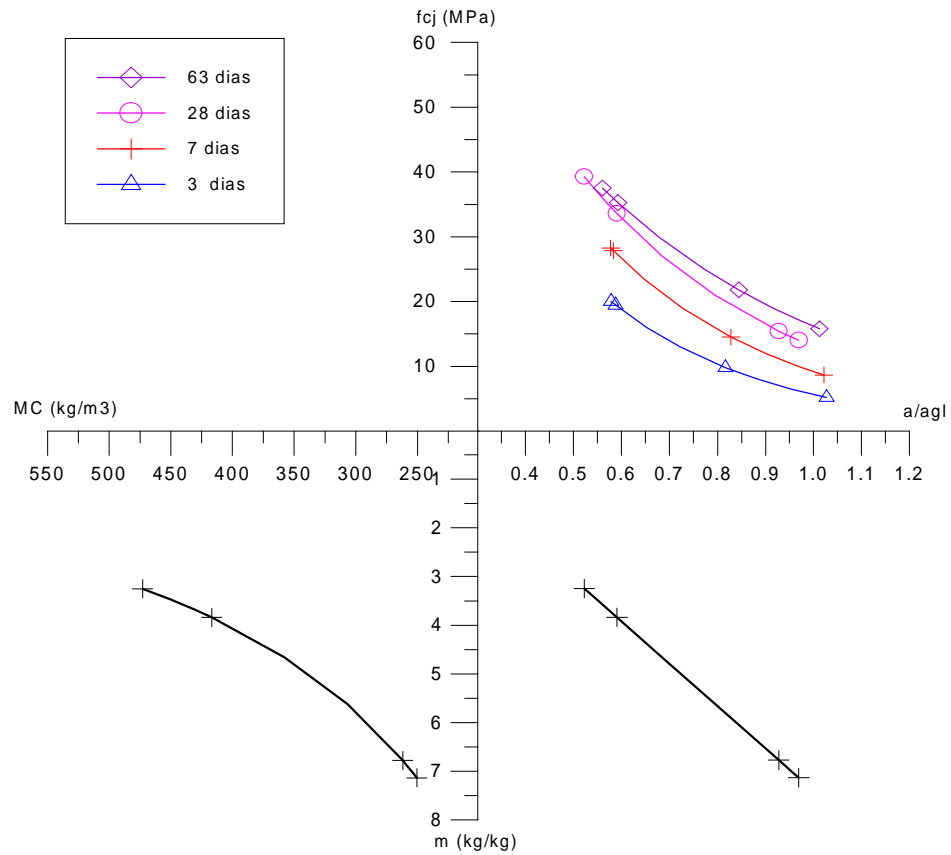


Figura 33: curva de dosagem para o CAA com metacaulim sem VMA

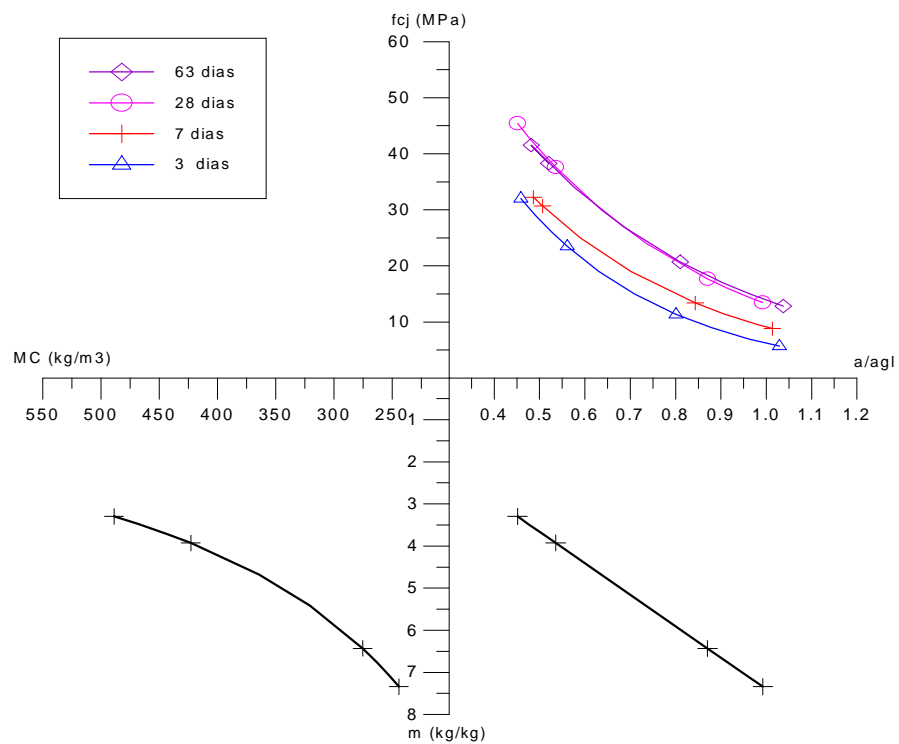


Figura 34: curva de dosagem para o CAA com metacaulim com VMA

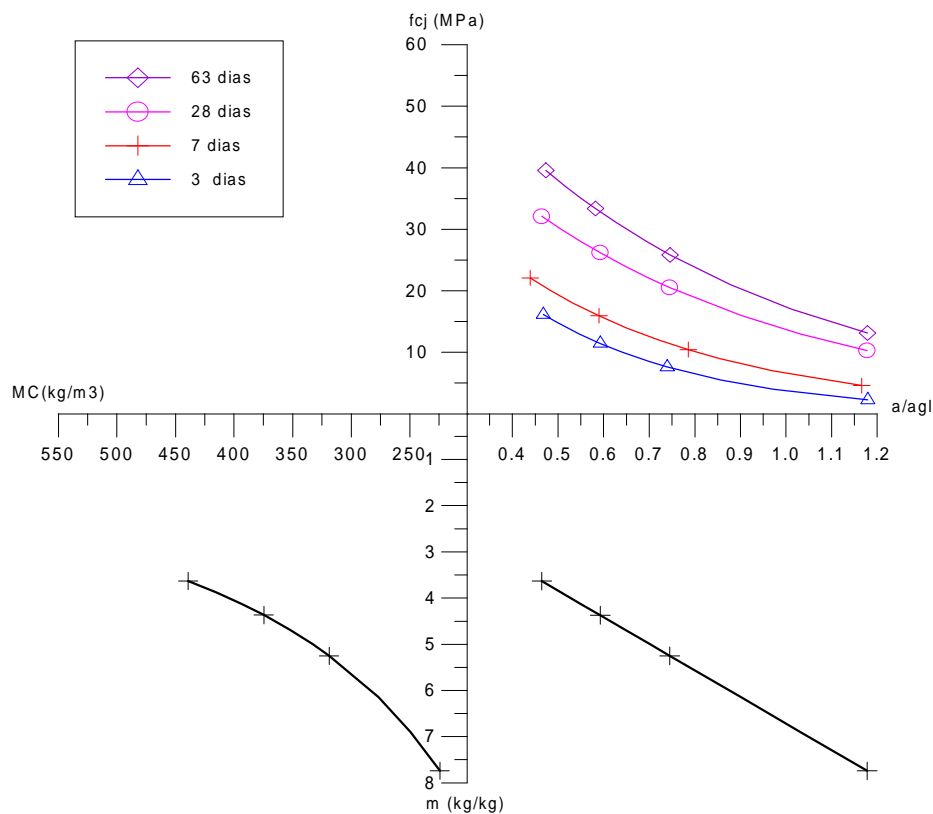


Figura 35: curva de dosagem para o CAA com cinza de casca de arroz sem VMA

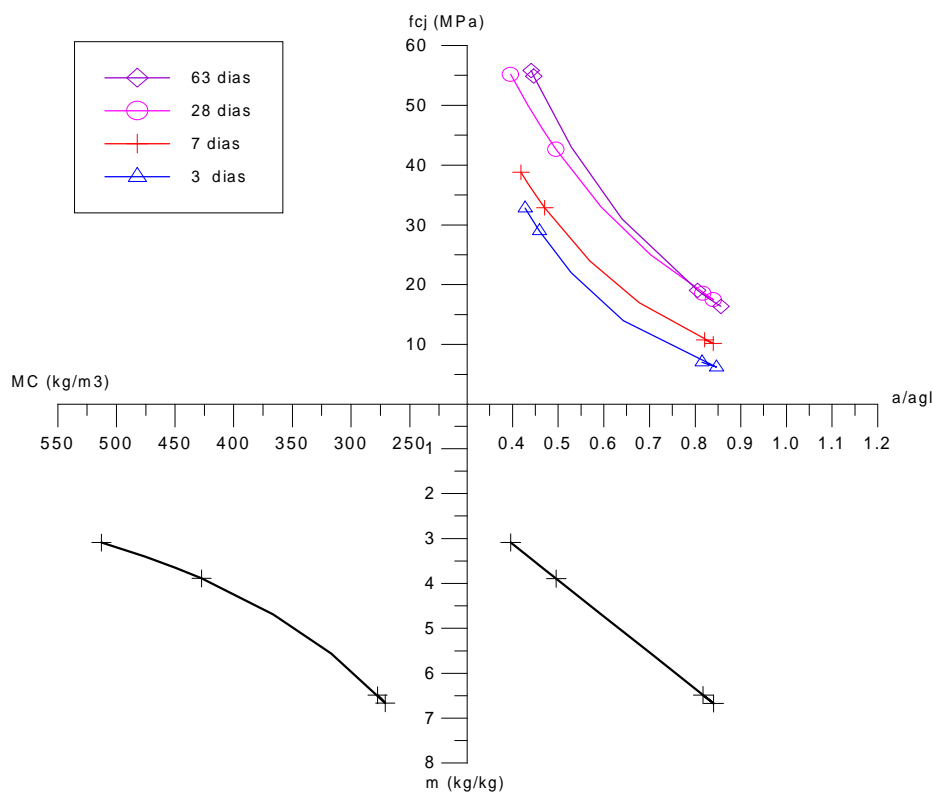


Figura 36: curva de dosagem para o CAA com cinza de casca de arroz com VMA

Com as curvas de dosagem e os parâmetros calculados anteriormente, pode-se determinar as equações de Abrams (3, 7, 28 e 63 dias), Lyse e consumo de aglomerantes pelo traço '1:m', que estão na tabela 40. Estas equações permitem que se calcule todos os componentes de um traço que se pretenda chegar, partindo de um requisito inicial, como por exemplo, a relação a/agl.

Com o traço determinado, pode-se calcular o custo dos concretos, utilizando as equações 37 ou 48. O custo dos concretos varia de acordo com o consumo dos materiais, mas com a tabela 39, pode-se corrigir o custo, em função dos consumos, para quaisquer parâmetros requeridos. Na tabela 39, C_u é o custo em reais e C, a, p, f, MC, CCA são, respectivamente, o consumo em kg/m³ de cimento, agregado miúdo, agregado graúdo, fíler calcáreo, metacaulim e cinza de casca de arroz.

Tabela 39: custo dos concretos em função dos consumos dos materiais

CONCRETOS	EQUAÇÕES DO CUSTO DOS CONCRETOS
REFERÊNCIA	$C_u = C * 0,4 + C * a * 0,013 + C * p * 0,02$
CAA FC sem VMA	$C_u = C * 0,4 + C * f * 0,08 + C * a * 0,013 + C * p * 0,02 + C * 0,0975$
CAA FC com VMA	$C_u = C * 0,4 + C * f * 0,08 + C * a * 0,013 + C * p * 0,02 + C * 0,105 + C * 0,05$
CAA MC sem VMA	$C_u = C * 0,4 + C * MC * 0,6 + C * a * 0,013 + C * p * 0,02 + C * 0,1125$
CAA MC com VMA	$C_u = C * 0,4 + C * MC * 0,6 + C * a * 0,013 + C * p * 0,02 + C * 0,1275 + C * 0,04$
CAA CCA sem	$C_u = C * 0,4 + C * CCA * 0,1 + C * a * 0,013 + C * p * 0,02 + C * 0,12$
CAA CCA com	$C_u = C * 0,4 + C * CCA * 0,1 + C * a * 0,013 + C * p * 0,02 + C * 0,1275 + C * 0,045$

5.5.2 Custo dos concretos em função da resistência à compressão

Sabe-se que o parâmetro inicial para a dosagem de um concreto estrutural normalmente é a resistência à compressão. Este fato faz com que se tenha de comparar o custo e as propriedades mecânicas dos concretos para determinadas faixas de resistência. Assim, com as equações determinadas, foram feitas comparações fixando resistência à compressão e calculando-se os consumos e custos. Foram utilizadas duas idades de ruptura para a comparação do custo, 28 e 63 dias, as quatro idades para a comparação do consumo de cimento e três faixas de resistência à compressão, 20, 30 e 40 MPa.

A figura 37 mostra o consumo do cimento em kg/m^3 para cada idade de ruptura (3, 7, 28 e 63 dias). Observa-se que para valores de uma mesma resistência à compressão (30 MPa), o consumo de cimento decai significativamente do concreto convencional para os CAA com metacaulim e cinza de casca de arroz, com diferenças de 68% do concreto referência para o CAA com cinza de casca de arroz com modificador de viscosidade e 78% para o CAA com cinza de casca de arroz sem VMA, aos 28 dias. O consumo decai também ao longo das idades, como exemplo o CAA com metacaulim sem VMA, que obteve a mesma resistência com 57% de consumo de cimento menor aos 63 dias se comparado aos 3 dias ou o CAA com fíler calcáreo sem VMA com queda de 27% no consumo de cimento dos 3 aos 63 dias. Isto se deve aos valores de resistência, que vão aumentando.

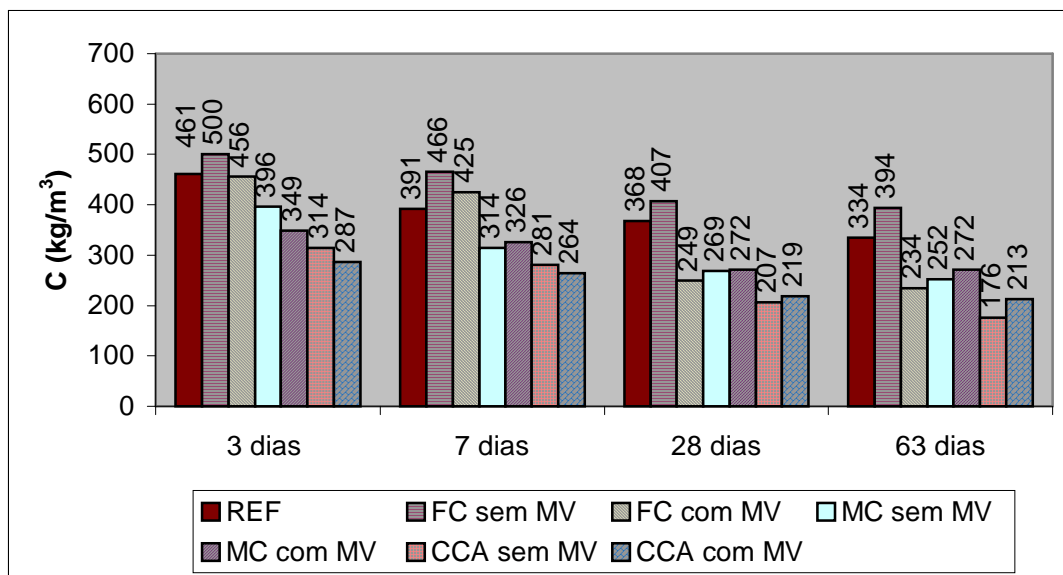


Figura 37: consumo de cimento (kg/m^3) dos concretos com $f_c=30$ MPa, variando as idades de ruptura

5.5.2.1 Idade de ruptura dos corpos-de-prova aos 28 dias

Para que se pudesse comparar os custos dos concretos para uma determinada resistência à compressão, teve que se calcular o traço através das equações da tabela 39, para então se determinar os consumos e os custos de cada um dos materiais. Mas nos CAA com fíler calcáreo, ocorreu um pequeno problema: na dosagem, não se pode fixar proporções entre o fíler calcáreo e areia, pois cada traço exigiu uma diferente quantidade de fíler. Quando calcula-se os consumos através das equações da tabela 40, se consegue apenas calcular o somatório dos agregados miúdos, assim foi feita uma média e arbitrou-se que a proporção

para o CAA com fíler calcáreo sem VMA seria de 50% areia e 50% fíler e para o CAA com VMA, seria de 60% de areia e 40% de fíler.

A figura 38 ilustra a comparação do custo entre todos os concretos dosados neste trabalho experimental, com resistência à compressão de 20 MPa aos 28 dias. Observa-se que o CAA com fíler calcáreo sem VMA ficou 32% mais caro que o CAA com fíler calcáreo com VMA. Esta alta diferença se deve basicamente ao elevado ganho de resistência pelo CAA com fíler calcáreo com VMA, verificado dos 7 para os 28 dias. Os outros CAA com adições apresentaram pouca diferença de custo entre os com e sem VMA (5% para o metacaulim e 10% para a cinza de casca de arroz, com os CAA sem VMA mais econômicos). Mas um fato interessante, é que os CAA com cinza de casca de arroz ficaram com os custos bastante próximos do custo do concreto referência, com aumento de 8% para o CAA com VMA e redução de 2% para o CAA sem VMA. O mesmo ocorreu com o CAA com fíler calcáreo com VMA, que teve um aumento de apenas 9%, em relação ao concreto referência. Isto quer dizer que pode-se utilizar um concreto auto-adensável com cinza de casca de arroz ou fíler calcáreo de mesmo valor que um convencional, porém aproveitando todas as vantagens já comentadas. Deve ser feita uma ressalva para o CAA com fíler calcáreo com VMA, pois este concreto obteve uma resistência à compressão mínima de 25,70 MPa aos 28 dias, o que obrigou a extrapolar o limite inferior das equações para o cálculo de 20 MPa, para efeito de comparações. Como já foi salientado, deve-se evitar extrapolações dos limites de resistência, tanto inferiores como superiores.

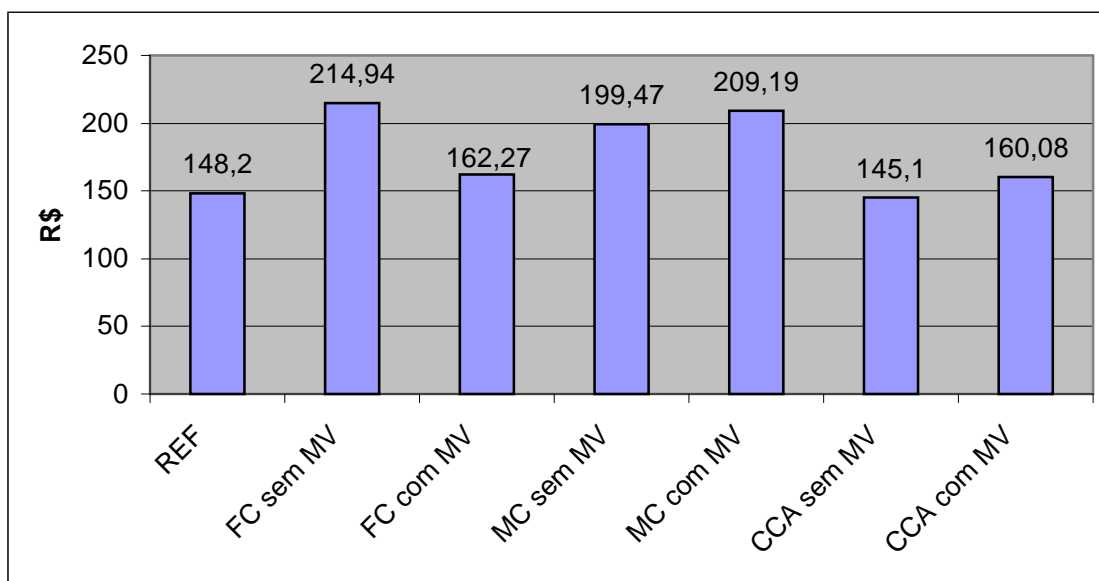


Figura 38: custo (R\$) dos concretos de $f_c=20$ MPa aos 28 dias

Ao analisar os custos dos concretos com resistência à compressão de 30 MPa aos 28 dias (figura 39), observa-se que não houve alterações significativas com relação ao custo dos com 20 MPa. Novamente, o CAA com fíler calcáreo sem VMA ficou mais caro que o CAA com fíler calcáreo com VMA, em 33%. Para os CAA com outras adições, o custo destes com VMA foi superior, em 2% para o metacaulim e 3,5% para a cinza de casca de arroz. Como esta diferença é pequena, pode-se dizer que é indiferente dosar um CAA de 30 MPa aos 28 dias com metacaulim ou cinza de casca de arroz como finos, com ou sem VMA, analisando a situação apenas economicamente. O custo dos CAA com metacaulim, se comparado com o concreto referência, foi cerca de 41% superior. Ao contrário, o custo dos CAA com cinza de casca de arroz foi apenas cerca de 3%, se comparado ao referência, o que certamente viabilizaria seu uso. E os CAA com fíler calcáreo apresentaram um aumento de apenas 7% com VMA e 42% sem VMA.

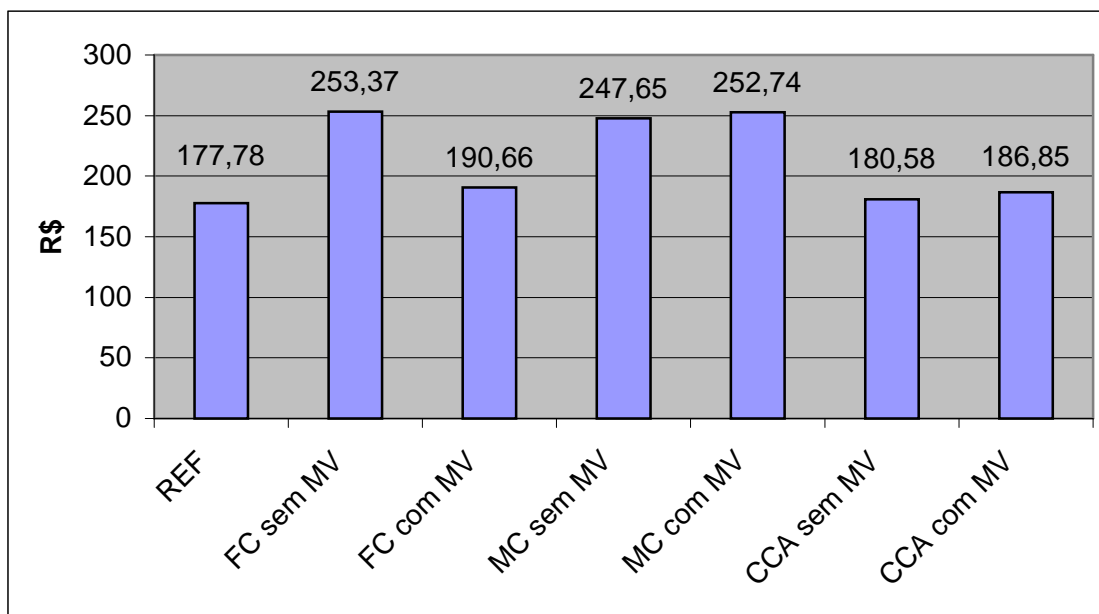


Figura 39 : custo (R\$) dos concretos de $f_c=30$ MPa aos 28 dias

Tabela 40: equações e coeficientes de correlação das curvas de dosagem

CONCRETOS	EQUAÇÕES E COEFICIENTES DE CORRELAÇÃO					
	Lei de Abrams				Lei de Lyse	MC X m
	3d	7d	28d	63d		
REFERÊNCIA	$fc3 = \frac{105,44}{17,24^{a/c}}$	$fc7 = \frac{118,06}{14,79^{a/c}}$	$fc28 = \frac{159,62}{22,01^{a/c}}$	$fc63 = \frac{126,91}{11,52^{a/c}}$	$m = 12 * a / c$ -1,56	$C = \frac{2184,1}{m + 1,0191}$
	R ² =0,98	R ² =0,99	R ² =1	R ² =0,97	R ² =0,99	R ² =1
CAA FC sem VMA	$fc3 = \frac{139,25}{18,78^{a/c}}$	$fc7 = \frac{136,71}{14,34^{a/c}}$	$fc28 = \frac{148,22}{12,45^{a/c}}$	$fc63 = \frac{141,87}{10,76^{a/c}}$	$m = 8,6617 * a / c$ -1,4412	$C = \frac{2099,1}{m + 1,1329}$
	R ² =0,98	R ² =0,99	R ² =1	R ² =1	R ² =0,92	R ² =1
CAA FC com VMA	$fc3 = \frac{94,91}{10,88^{a/c}}$	$fc7 = \frac{115,19}{12,43^{a/c}}$	$fc28 = \frac{105,97}{3,42^{a/c}}$	$fc63 = \frac{101,63}{3^{a/c}}$	$m = 6,2929 * a / c$ +0,6876	$C = \frac{1902,9}{m + 0,4602}$
	R ² =0,99	R ² =1	R ² =0,92	R ² =0,96	R ² =0,97	R ² =1
CAA MC sem VMA	$fc3 = \frac{113,16}{19,98^{a/agl}}$	$fc7 = \frac{131,25}{14,27^{a/agl}}$	$fc28 = \frac{130,89}{10,01^{a/agl}}$	$fc63 = \frac{109,62}{6,77^{a/agl}}$	$m = 8,7123 * a / agl$ -1,306	$MC = \frac{2073,4}{m + 1,1339}$
	R ² =1	R ² =0,99	R ² =0,87	R ² =0,99	R ² =0,92	R ² =1
CAA MC com VMA	$fc3 = \frac{128,09}{20,55^{a/agl}}$	$fc7 = \frac{106,71}{11,7^{a/agl}}$	$fc28 = \frac{125,43}{9,47^{a/agl}}$	$fc63 = \frac{115}{8,28^{a/agl}}$	$m = 7,4818 * a / agl$ -0,0808	$MC = \frac{1973,8}{m + 0,7375}$
	R ² =1	R ² =1	R ² =0,97	R ² =0,95	R ² =0,97	R ² =1
CAA CCA sem VMA	$fc3 = \frac{58,86}{15,86^{a/agl}}$	$fc7 = \frac{56,99}{8,68^{a/agl}}$	$fc28 = \frac{67,28}{4,92^{a/agl}}$	$fc63 = \frac{82,95}{4,78^{a/agl}}$	$m = 5,7592 * a / agl$ +0,9594	$MC = \frac{1886,9}{m + 0,6659}$
	R ² =0,99	R ² =0,97	R ² =0,99	R ² =0,99	R ² =0,84	R ² =0,99
CAA CCA com VMA	$fc3 = \frac{179,6}{53,04^{a/agl}}$	$fc7 = \frac{146,79}{24,04^{a/agl}}$	$fc28 = \frac{153,64}{13,28^{a/agl}}$	$fc63 = \frac{205,12}{19,12^{a/agl}}$	$m = 8,0675 * a / agl$ +0,1070	$MC = \frac{2054,7}{m + 0,9171}$
	R ² =0,99	R ² =0,99	R ² =0,99	R ² =0,99	R ² =0,87	R ² =0,99

Método para Dosagem de Concretos Auto-adensáveis

Tabela 41: resistências à compressão e ganhos de resistência ao longo do tempo

CONCRETOS	3d	7d	28d c	63d	28d t	3/7	7/28	3/28	28/63	28 t/28 c
REFERÊNCIA	32,3	38,7	46,3	45,1	3,4	0,83	0,84	0,70	1,03	0,07
	28,0	32,7	35,5	42,0	3,0	0,86	0,92	0,79	0,85	0,08
	18,2	23,3	23,8	27,9	2,4	0,78	0,98	0,77	0,85	0,10
	11,7	14,5	14,9	19,2	1,4	0,81	0,98	0,79	0,78	0,10
CAA FC sem VMA	35,1	38,3	43,0	44,7	3,1	0,92	0,89	0,81	0,96	0,07
	12,6	15,8	21,4	21,2	1,6	0,79	0,74	0,59	1,01	0,07
	12,8	15,9	18,6	21,4	2,0	0,80	0,86	0,69	0,87	0,11
	7,8	9,7	11,6	13,0	1,2	0,80	0,83	0,67	0,90	0,10
CAA FC com VMA	37,9	46,1	57,4	61,2	3,1	0,82	0,80	0,66	0,94	0,05
	22,7	25,0	59,2	58,7	3,0	0,91	0,42	0,38	1,01	0,05
	13,5	13,4	41,0	41,3	2,5	1,01	0,33	0,33	0,99	0,06
	6,9	7,6	25,7	29,5	1,6	0,91	0,30	0,27	0,87	0,06
CAA MC sem VMA	20,0	28,3	39,3	37,5	2,6	0,71	0,72	0,51	1,05	0,07
	19,5	27,9	33,6	35,3	2,8	0,70	0,83	0,58	0,95	0,08
	9,8	14,5	15,4	21,8	1,6	0,68	0,94	0,63	0,71	0,10
	5,2	8,7	14,0	15,8	1,2	0,60	0,62	0,37	0,89	0,09
CAA MC com VMA	32,0	32,2	45,4	38,3	3,2	0,99	0,71	0,71	1,19	0,07
	23,5	30,7	37,6	41,6	2,2	0,77	0,82	0,62	0,90	0,06
	11,4	13,4	17,7	20,7	2,3	0,85	0,76	0,64	0,85	0,13
	5,7	8,8	13,5	12,8	1,8	0,65	0,65	0,42	1,05	0,14
CAA CCA sem VMA	16,1	22,1	32,1	39,6	2,8	0,73	0,69	0,50	0,81	0,09
	11,4	15,9	26,2	33,4	2,2	0,72	0,61	0,44	0,78	0,08
	7,6	10,4	20,5	25,8	1,2	0,73	0,51	0,37	0,80	0,06
	2,3	4,6	10,3	13,1	1,1	0,49	0,45	0,22	0,79	0,10
CAA CCA com VMA	32,8	38,8	55,2	55,8	4,5	0,85	0,70	0,59	0,99	0,08
	29,0	32,9	42,6	54,9	3,6	0,88	0,77	0,68	0,78	0,08
	6,2	10,2	17,5	19,0	1,7	0,61	0,58	0,36	0,92	0,10
	7,1	10,8	18,6	16,4	1,6	0,65	0,58	0,38	1,13	0,09

Tabela 42: custo dos materiais em reais por MPa nas idades especificadas

CONCRETOS	TOTAL	R\$/3	R\$/7	R\$/28 c	R\$/63	R\$/28 t
REFERÊNCIA	243,40	7,53	6,28	5,26	5,40	72,23
	189,80	6,78	5,80	5,34	4,52	63,48
	156,84	8,62	6,74	6,60	5,63	64,81
	134,12	11,45	9,23	9,01	6,99	93,79
CAA FC sem VMA	303,71	8,66	7,93	7,06	6,79	98,61
	232,68	18,53	14,73	10,89	11,00	150,12
	205,43	16,09	12,89	11,03	9,61	103,23
	178,54	23,01	18,48	15,34	13,76	148,78
CAA FC com VMA	343,13	9,06	7,44	5,98	5,65	108,93
	261,94	11,53	10,46	4,43	4,46	88,49
	214,59	15,93	16,01	5,24	5,25	85,84
	183,79	26,60	24,12	7,15	6,20	116,32
CAA MC sem VMA	313,44	15,65	11,08	7,98	8,35	120,55
	245,61	12,61	8,82	7,31	6,96	87,10
	197,15	20,10	13,57	12,76	9,04	122,45
	166,19	31,84	19,15	11,84	10,52	137,35
CAA MC com VMA	345,94	10,80	10,73	7,61	9,03	108,11
	267,05	11,37	8,70	7,10	6,43	119,75
	211,16	18,59	15,76	11,92	10,18	90,24
	177,05	31,01	20,07	13,14	13,79	96,22
CAA CCA sem VMA	194,21	12,03	8,80	6,05	4,91	68,63
	156,82	13,72	9,84	5,99	4,70	71,94
	131,89	17,31	12,63	6,42	5,11	109,91
	106,30	47,04	23,16	10,32	8,10	99,35
CAA CCA com VMA	259,01	7,90	6,68	4,70	4,64	57,56
	206,34	7,12	6,28	4,84	3,76	57,00
	158,99	25,60	15,65	9,09	8,35	94,64
	142,12	20,16	13,17	7,66	8,68	87,73

Método para Dosagem de Concretos Auto-adensáveis

E, finalizando a análise econômica comparativa de todos os concretos do estudo experimental aos 28 dias, a figura 40 mostra os valores para a dosagem das misturas para 40 MPa de resistência à compressão. Nesta faixa de resistência, houve uma inversão do custo comparativo entre os CAA com e sem VMA, já que os últimos ficaram mais caros, o que não estava ocorrendo. Nota-se que a diferença é mínima, de 1% para os CAA com metacaulim e 5% para os com cinza de casca de arroz, que pode, inclusive, ser causada por alguma variação nos ensaios. Mas, os CAA com metacaulim apresentaram, novamente, um custo bastante superior ao concreto referência, de cerca de 41%, o que provavelmente dificultaria sua viabilidade econômica. E os CAA com cinza de casca de arroz tiveram um aumento de custo de apenas 4% em relação ao concreto referência, o que permite concluir com base nas figuras 38 a 40, para estes materiais, que o CAA com cinza de casca de arroz pode ser utilizado com ganhos econômicos expressivos para qualquer resistência convencional. E, por fim, os CAA com fíler calcáreo apresentaram um aumento de custo, se comparado ao concreto referência, de 41% para o sem VMA e 7% para o com VMA. Deve-se, novamente, ressaltar que tiveram de ser extrapoladas as equações para o cálculo do traço de 40 MPa do CAA com cinza de casca de arroz sem VMA, pois este concreto chegou a uma resistência máxima de 32,1 MPa.

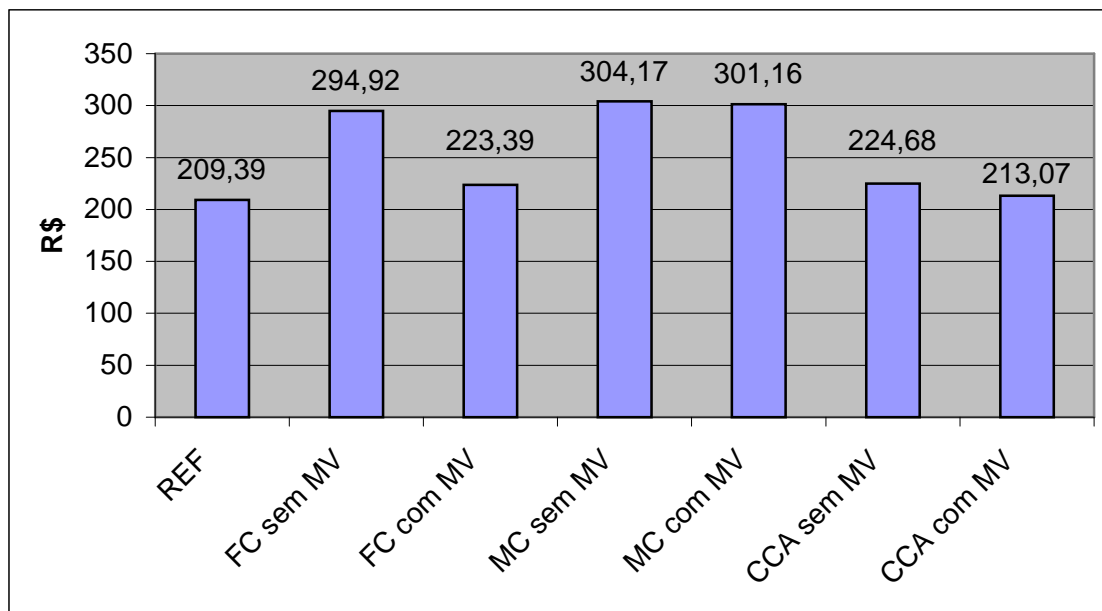


Figura 40: custo (R\$) dos concretos de $f_c=40$ MPa aos 28 dias

5.5.2.2 Idade de ruptura dos corpos-de-prova aos 63 dias

Também foram comparados os custos do concreto convencional referência e dos CAA com diversos finos, aos 63 dias, com resistência à compressão de 20 MPa, como observa-se na figura 41. Através das equações da tabela 40, calculou-se os traços e após os custos de cada concreto. Observa-se que o CAA com fíler calcáreo sem VMA ficou 56% mais caro que o concreto referência, enquanto que o CAA com fíler calcáreo com VMA ficou 11% mais caro, valor que já poderia viabilizar sua utilização em estruturas reais. A diferença de custo entre os CAA com fíler calcáreo e o referência aumentou dos 28 para os 63 dias, devido ao ganho de resistência superior do concreto convencional, em relação ao CAA. Os CAA com metacaulim novamente ficaram mais caros que o referência, em 55% para o sem VMA e 47% para o com VMA. Novamente a diferença de custo aumentou dos 28 para os 63 dias, pelo maior ganho de resistência observado no concreto referência. Sabe-se que pozolanas, como o metacaulim, obtém ganhos de resistência em idades mais avançadas, mas este ganho, neste caso, foi menor que o obtido pelo concreto convencional, que, normalmente, atinge quase toda a resistência aos 28 dias. Este fato ocorreu, provavelmente, devido a presença de adições no cimento ARI-RS, já que este é resistente a sulfatos e a **NBR 5737** (ABNT, 1992) permite adições em uma certa quantidade. O CAA com cinza de casca de arroz mostrou-se o mais econômico dos CAA, novamente. O sem VMA ficou 3% mais econômico que o referência, enquanto o com VMA ficou 19% mais caro. Esta diferença entre os CAA com cinza de casca de arroz foi expressiva e deve-se, basicamente, ao fato de que o traço 1:4,5 do CAA com cinza de casca de arroz com VMA alcançou resistências à compressão muito baixas, fazendo com que fosse necessário a utilização de traços mais ricos e, conseqüentemente, mais caros para alcançar os 20 MPa. Não se pode obter uma relação de custo entre os CAA sem e com VMA, pois o sem VMA com fíler calcáreo ficou mais caro que o com VMA, enquanto o sem VMA com metacaulim e cinza de casca de arroz ficou mais econômico que o sem VMA. Também deve se fazer uma ressalva ao cálculo do CAA com fíler calcáreo com VMA, que teve o valor de resistência à compressão mais baixo de 29,5 MPa aos 63 dias, ou seja, teve que se extrapolar os valores para chegar a 20 MPa, o que não é aconselhável.

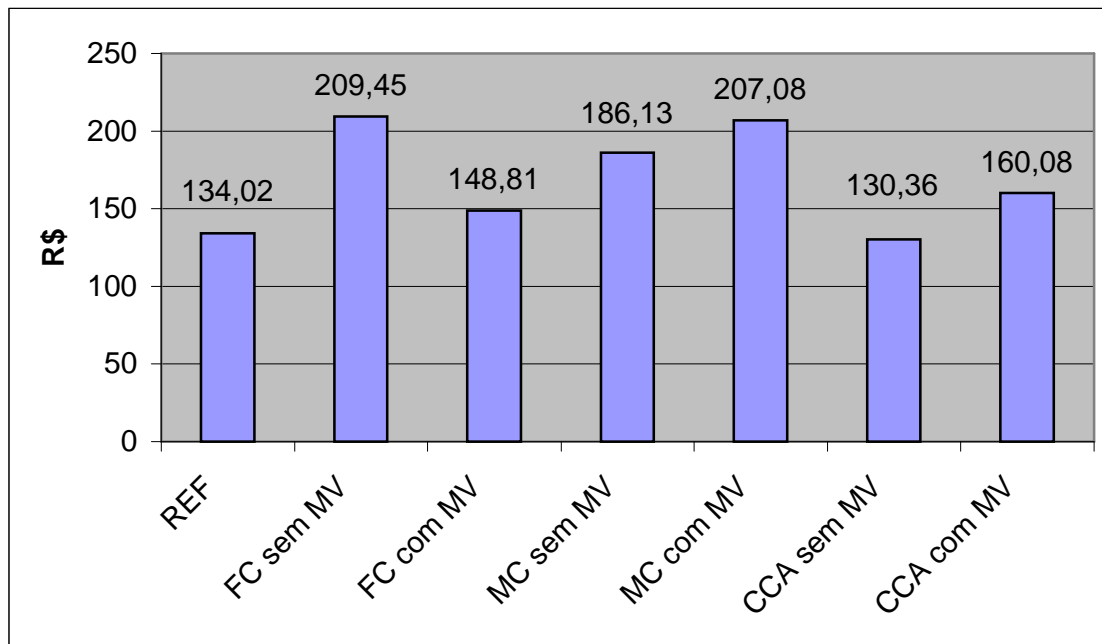


Figura 41 : custo (R\$) dos concretos de $f_c=20$ MPa aos 63 dias

Pode-se observar, na figura 42, que o custo dos CAA com adições se aproximou do custo do concreto referência, aos 63 dias, para resistência à compressão de 30 MPa, já que é mais caro aumentar os valores de resistência para concretos convencionais. O CAA com fíler calcáreo sem VMA ficou 50% mais caro e o CAA com fíler calcáreo com VMA ficou 7% mais caro que o concreto referência. Os CAA com metacaulim também diminuíram a diferença para o referência, para 42% o sem VMA e 53% o com VMA. E, novamente, o CAA com cinza de casca de arroz sem VMA ficou mais econômico, em 4%, e o com VMA ficou apenas 11% mais caro que o concreto convencional. Observa-se que o CAA com fíler calcáreo com VMA e os CAA com cinza de casca de arroz poderiam, após um estudo detalhado, substituir o concreto convencional em uma estrutura com concreto calculado para resistência à compressão de 30 MPa aos 63 dias. E, os CAA com metacaulim e cinza de casca de arroz apresentaram o custo superior para os com VMA, enquanto o CAA com fíler calcáreo apresentou o custo do com VMA mais econômico, não permitindo, assim, que se tirasse conclusões a este respeito.

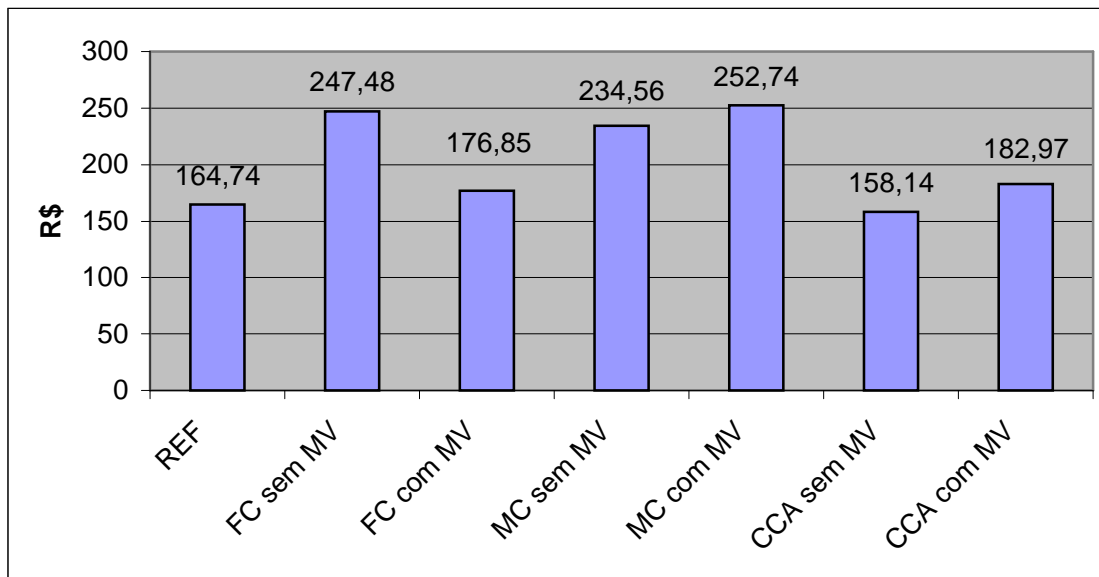


Figura 42: custo (R\$) dos concretos de $f_c=30$ MPa aos 63 dias

E, por fim, a figura 43 ilustra a comparação de custo para concretos com resistência à compressão de 40 MPa, aos 63 dias. O CAA com fíler calcáreo sem VMA ficou 44% mais caro e o CAA com fíler calcáreo com VMA ficou apenas 3% mais caro que o concreto referência. Novamente, observa-se que a diferença de custo entre os CAA e o concreto convencional vai diminuindo com o aumento dos valores de resistência. Para o CAA com metacaulim, o custo se manteve praticamente constante ao observado na resistência de 30 MPa, pois o sem VMA ficou 46%, enquanto o com VMA ficou 52% mais caro que o concreto referência. E, finalmente, o CAA com cinza de casca de arroz sem VMA ficou 6% mais econômico, e o com VMA ficou somente 2% mais caro que o concreto convencional, ou seja, pode-se substituir um concreto de abatimento convencional por um auto-adensável, de mesma faixa de resistência, pelo mesmo valor ou até mais baixo. Novamente, deve-se ressaltar que alguns concretos não alcançaram os 40 MPa de resistência à compressão, tendo que extrapolar valores para que se pudesse comparar concretos de mesma faixa. Os CAA com metacaulim obtiveram 37,5 MPa, o sem VMA, e 38,3 MPa, o com VMA, enquanto que o CAA com cinza de casca de arroz sem VMA chegou a 39,6 MPa. Observa-se que, apesar destes concretos não alcançarem a resistência esperada, faltou pouco, não afetando significativamente as comparações.

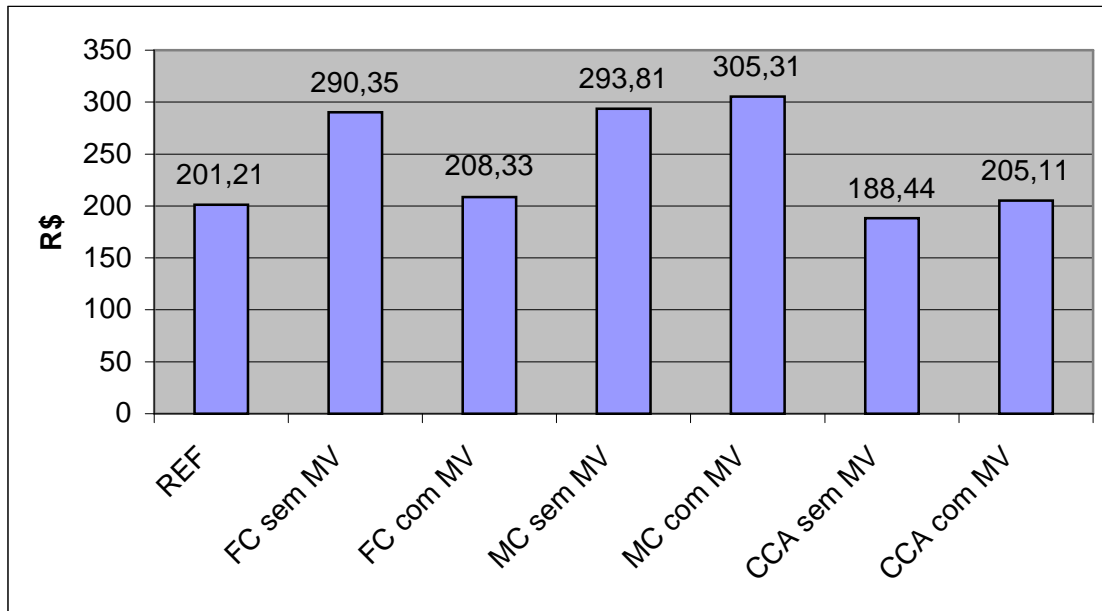


Figura 43: custo (R\$) dos concretos de $f_c=40$ MPa aos 63 dias

5.5.3 Custo em R\$/MPa dos concretos em função dos valores de resistência à compressão aos 28 e 63 dias

As figuras 44 e 45 mostram a evolução dos valores de resistência à compressão dos concretos aos 28 e 63 dias, respectivamente. Observa-se nas figuras, que a medida que a resistência à compressão vai aumentando a relação R\$/MPa vai diminuindo, para todos os concretos. Ou seja, é mais vantajoso utilizar valores de resistência superiores, do ponto de vista econômico. Também pode-se observar nas figuras, que a medida que a resistência vai aumentando, menor fica a diferença de custo entre o concreto convencional e os auto-adensáveis, assim, pode-se afirmar, que, para estes materiais, quanto maior a resistência, maior a possibilidade de que os CAA fiquem economicamente viáveis.

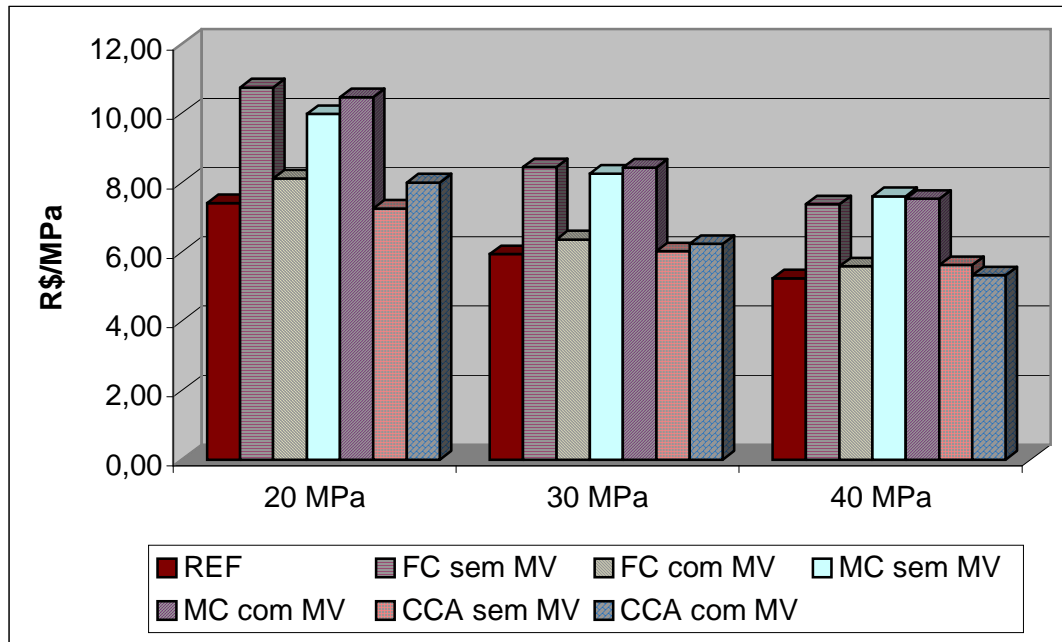


Figura 44: custo (R\$/MPa) dos concretos em função da resistência à compressão aos 28 dias

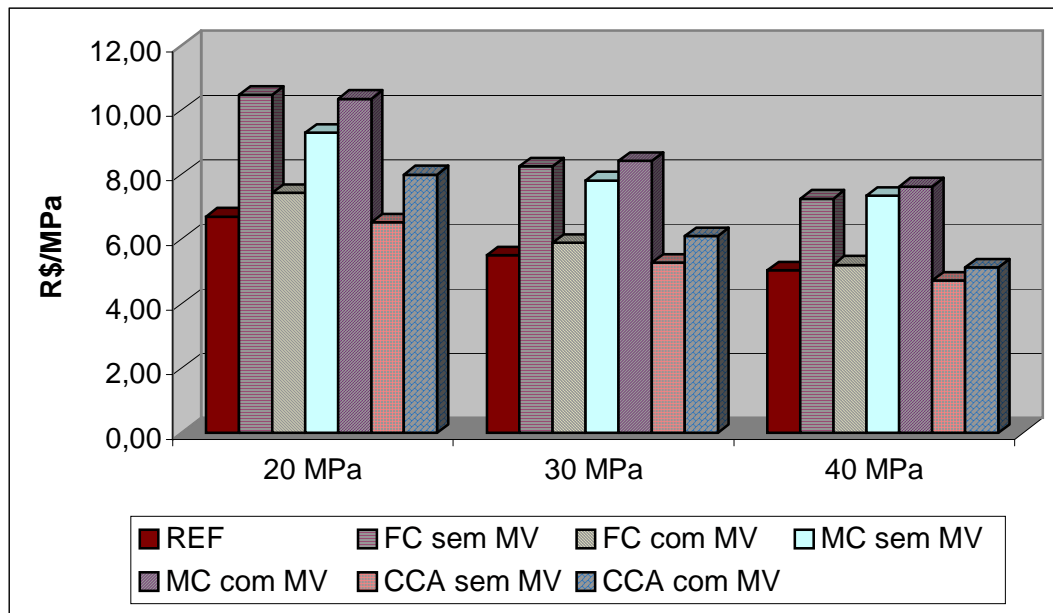


Figura 45: custo (R\$/MPa) dos concretos em função da resistência à compressão aos 63 dias

5.5.4 Custo (R\$) dos concretos em função do traço '1:m' aos 3, 7, 28 e 63 dias

As figuras de 46 a 49 mostram os valores comparativos para todos os concretos estudados, em reais por MPa, para cada traço (1:3, 1:4,5, 1:6 e 1:7,5) e para cada idade de ensaio de resistência à compressão (3, 7, 28 e 63 dias). Este parâmetro, custo em reais por MPa, é muito útil para analisar a relação custo/benefício, pois este determina quanto custa para alcançar cada MPa.

Na figura 46, observa-se os valores para 3 dias de idade dos concretos, onde o concreto convencional se mostrou o mais econômico para todos os traços, embora os CAA com fíler calcáreo e o com cinza de casca de arroz com VMA tenham apresentado custos próximos para o traço 1:3, ocorrendo o mesmo para o CAA com cinza de casca de arroz com VMA para o traço 1:4,5. Também pode-se observar que os traços mais ricos (1:3 e 1:4,5) foram mais econômicos que os mais pobres, em reais por MPa, significando que os primeiros são mais viáveis. Ou seja, caso seja possível, deve-se utilizar os traços mais ricos, de preferência o 1:4,5, para as mesmas características básicas.

A figura 46 também mostra que nos traços mais ricos o custo do concreto referência vai se mantendo próximo dos CAA, mas quando se analisa os custos nos traços mais pobres, ocorre um salto para os CAA, ou seja, o concreto convencional se torna muito mais viável que os auto-adensáveis, devido, principalmente, que altos teores de adições exigem bastante água, elevando a relação a/agl, deixando os traços mais pobres com resistência muito baixas. Observa-se o custo do traço 1:7,5 do CAA com cinza de casca de arroz sem VMA, de R\$47,04 por MPa, extremamente anti-econômico. Quer dizer que, para cada MPa, necessita-se gastar R\$47,04, aos 3 dias.

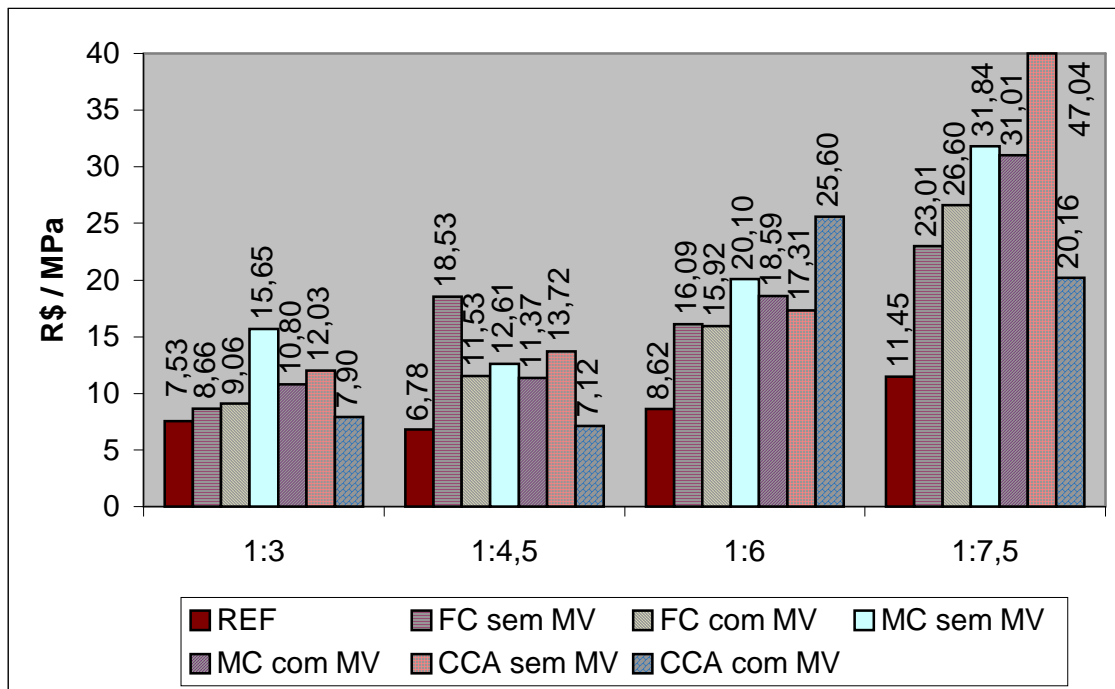


Figura 46: custo por MPa dos concretos aos 3 dias

Como já era de se esperar, o custo por MPa baixou dos 3 para os 7 dias, pois o custo é o mesmo e a resistência à compressão tende a aumentar com o passar das idades, como observa-se na figura 47. Novamente, os traços mais ricos foram os de melhor relação custo/benefício, para todos os concretos, com exceção do CAA com fíler calcáreo sem VMA, onde o traço 1:6 foi mais barato que o traço 1:4,5. O concreto de melhor relação custo/benefício foi o convencional, embora os CAA com fíler calcáreo tiveram relações próximas no traço 1:3, com aumento de 26% para o sem VMA e 18% para o com VMA. Os CAA com cinza de casca de arroz variaram bastante, pois o sem VMA ficou 40% mais caro, enquanto o com VMA ficou apenas 6% mais caro, no traço 1:3. Os CAA com metacaulim foram, no mínimo 50% mais caros que os outros concretos no traço 1:3, mas foram elevando aos poucos o custo por MPa, até que, no traço 1:7,5, ficaram mais econômicos que o CAA com fíler calcáreo com VMA e o com cinza de casca de arroz sem VMA, e pouco mais caro que o CAA com fíler calcáreo sem VMA.

Nos traços mais ricos, especificamente o 1:3, os CAA com VMA foram todos mais econômicos que os sem VMA, em 6% para o fíler calcáreo, 3% para o metacaulim e 24% para a cinza de casca de arroz. Para o traço 1:4,5, os CAA com VMA foram 29% mais econômicos para o fíler calcáreo, 1% para o metacaulim e 36% para a cinza de caca de arroz. E nos traços

mais pobres (1:6 e 1:7,5), os custos praticamente se equipararam, com uma leve vantagem para os CAA sem VMA.

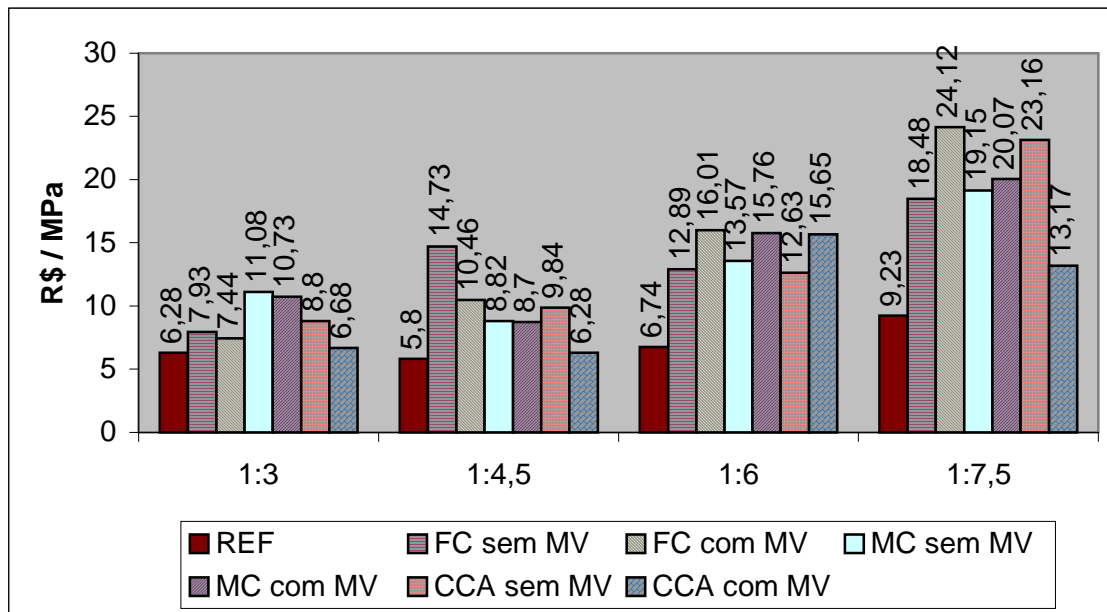


Figura 47: custo por MPa dos concretos aos 7 dias

A figura 48 mostra a análise do custo em reais por MPa de cada traço de cada concreto, aos 28 dias, onde já se apresenta alguns casos em que os CAA se tornaram mais econômicos que o concreto referência. No traço 1:3, o CAA com cinza de casca de arroz com VMA ficou 11% mais econômico que o referência, enquanto que o CAA com fíler calcáreo com VMA e o CAA com cinza de casca de arroz sem VMA ficaram, apenas, 14% e 15% respectivamente, mais caros. No traço 1:4,5, além do CAA com cinza de casca de arroz com VMA, que ficou 9% mais econômico, o CAA com fíler calcáreo com VMA apresentou uma melhor relação custo/benefício, com valor de 17% inferior. O CAA com cinza de casca de arroz sem VMA ficou apenas 12% mais caro, mas a surpresa foi o CAA com fíler calcáreo sem VMA, que teve um custo mais de duas vezes maior que o referência. Nos traços mais pobres, os CAA com cinza de casca de arroz e com fíler calcáreo com VMA continuaram competindo economicamente com o concreto referência, sendo que o CAA com fíler calcáreo com VMA chegou a ficar 20% mais econômico, nos traços 1:6 e 1:7,5.

O custo em reais por unidade de resistência à compressão dos CAA com VMA foi, novamente, inferior ao custo dos CAA sem VMA. O traço de melhor relação custo/benefício foi o 1:4,5, com o traço 1:3 parecido, inclusive superando-o em alguns concretos. No lado

oposto, está o traço 1:7,5, onde os concretos, salvo algumas exceções como os CAA com metacaulim sem VMA e com cinza de casca de arroz com VMA, exigiram a maior quantia em reais por unidade de resistência à compressão.

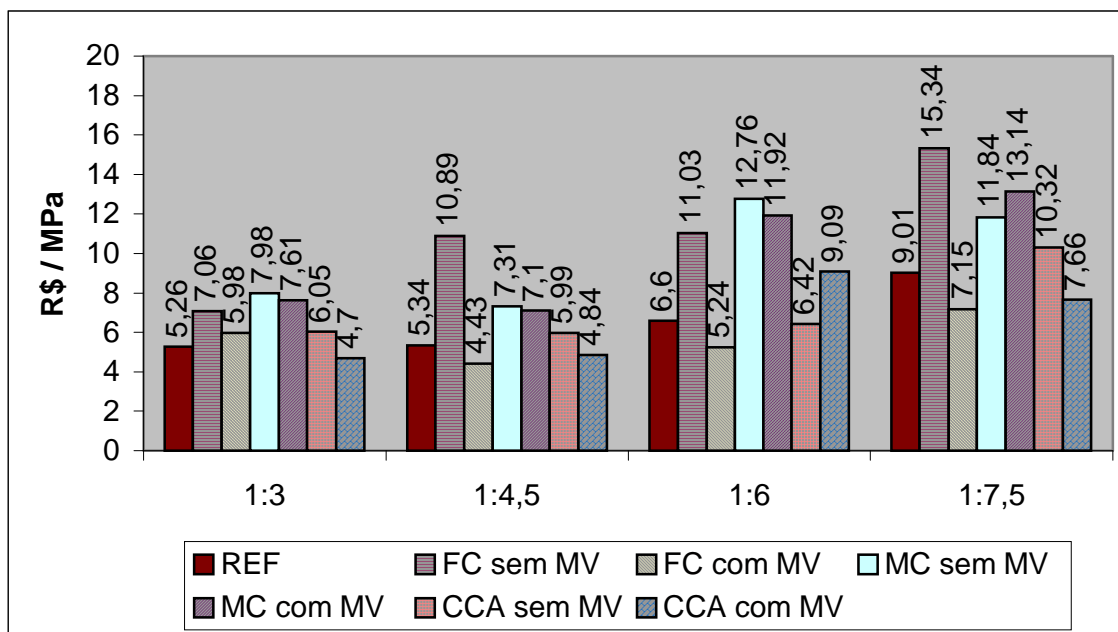


Figura 48: custo por MPa dos concretos aos 28 dias

O custo por MPa dos concretos, aos 63 dias, decaiu, conforme mostra a figura 49, se comparado aos verificados nos 28 dias. Esta tendência de queda é devido à resistência à compressão, que aumenta ao longo do tempo, com o custo dos concretos se mantendo inalterado.

Novamente, o traço de melhor relação custo/benefício foi o 1:4,5, onde o CAA com cinza de casca de arroz com VMA apresentou a melhor relação custo/benefício entre todos os traços, de todos os concretos, em todas as idades: R\$3,76 / MPa. Ou seja, são necessários apenas R\$3,76 para alcançar cada MPa com um CAA com cinza de casca de arroz com VMA, aos 63 dias. O traço 1:3 ficou um pouco menos econômico que o 1:4,5, mas a surpresa foi o traço 1:6, que se aproximou bastante dos traços mais ricos. E, novamente, o traço 1:7,5 foi o pior, devendo ser evitado, se for analisado somente este parâmetro.

Apesar do CAA com cinza de casca de arroz com VMA ter apresentado o melhor resultado de todos, foi o CAA com fíler calcáreo com VMA que se aproximou em todos os traços do concreto referência, inclusive sendo mais viável nos traços 1:4,5, 1:6 e 1:7,5. O CAA com

fíler calcáreo sem VMA, em todas as idades, teve um desempenho muito ruim, para o traço 1:4,5. Este fato se deve, basicamente, que este concreto teve uma relação a/c muito próxima da relação a/c do traço 1:6, de 0,78 contra 0,81. Ou seja, os traços 1:4,5 e 1:6 tiveram resistência à compressão similares, mas o 1:4,5 custa mais, devido ao maior consumo de cimento, fazendo com que a relação custo/benefício seja prejudicada.

E, por fim, os CAA com e sem VMA se alternaram nesta idade. Ora um era mais vantajoso, ora outro.

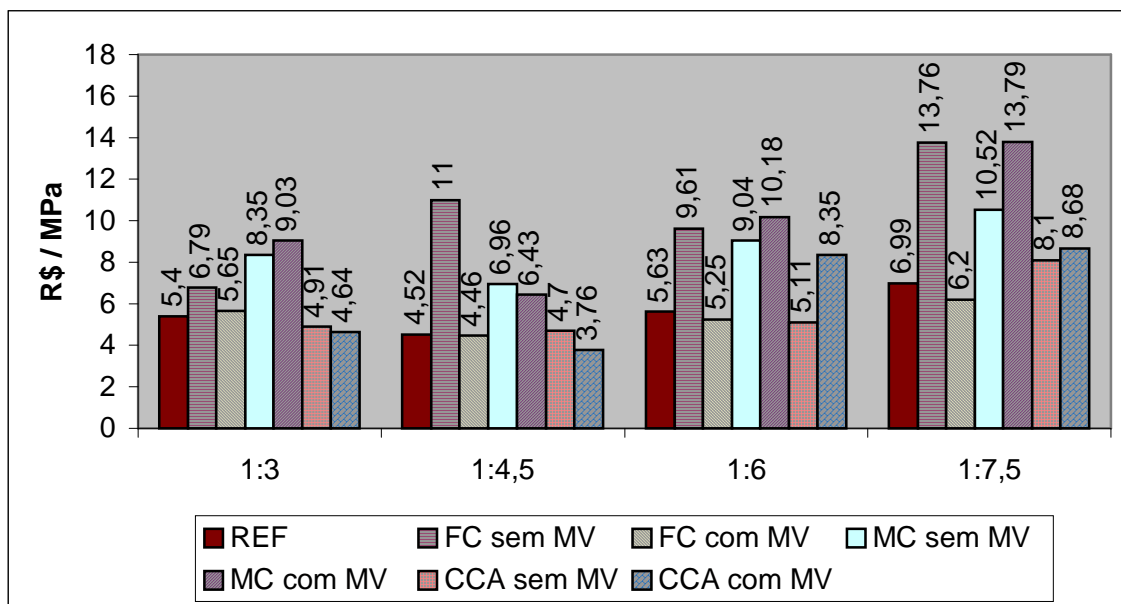


Figura 49: custo por MPa dos concretos aos 63 dias

Estes resultados são muito significativos, pois chegou-se a CAA pouco mais caros ou até mais econômicos que os concretos convencionais, ao contrário do que muitos autores relatam, como Ho *et al.* (2001, p.1377) que comentam que o CAA em Singapura chega a custar 150% mais que o CC.

6 CONSIDERAÇÕES FINAIS

6.1 CONCLUSÕES

A utilização do CAA vêm aumentando consideravelmente nos últimos anos, pois este novo tipo de concreto possibilita vários ganhos. Mas problemas como a falta de normalização dos equipamentos para a medição da trabalhabilidade, a falta de métodos de dosagem consagrados e a falta de conhecimento técnico dos profissionais da área sobre este material têm limitado sua disseminação.

Após levantamento bibliográfico, chegou-se a valores usuais ou consensuais entre os propostos por outros autores, e concluiu-se que os resultados e as dimensões dos equipamentos para medir a trabalhabilidade do CAA não são muito discrepantes, podendo-se normalizar estes, após alguns debates.

Também pode-se concluir que, com o método de dosagem proposto nesta dissertação, poderá ser mais simples a dosagem do CAA. A utilização de materiais locais, inclusive a de resíduos industriais em substituição ao cimento, pode estimular uma maior utilização do CAA. Assim como o método de dosagem IPT/EPUSP para concretos convencionais, este método é rápido e simples.

E, através do trabalho experimental realizado para demonstração do método, pode-se concluir que:

- a) deve ser utilizado o teor de argamassa necessário para somente, preencher os vazios entre os agregados graúdos no CAA, para não aumentar o custo, nem a chance de ocorrência de manifestações patológicas;
- b) o custo global por metro cúbico dos concretos convencionais foi inferior aos CAA com fíler calcáreo e metacaulim, porém foi cerca de 20% superior ao do CAA com cinza de casca de arroz, para os mesmos traços '1:m';

- c) o custo global por metro cúbico dos CAA com cinza de casca de arroz foi inferior ao dos CAA com fíler calcáreo e metacaulim, os quais apresentaram um custo similar, para os mesmos traços '1:m';
- d) o custo global por metro cúbico dos CAA sem VMA foi sempre inferior ao dos CAA com VMA, para os mesmos traços '1:m';
- e) o consumo de cimento, em kg/m^3 , para a resistência à compressão de 30 MPa, diminuiu com a evolução da idade, para todos os concretos;
- f) o consumo de cimento, em kg/m^3 , para a resistência à compressão de 30 MPa, foi inferior para os CAA com finos pozolânicos (metacaulim e cinza de casca de arroz) se comparado com o CAA com fíler calcáreo sem VMA e o concreto referência;
- g) pode-se dosar CAA com custos similares ou até inferiores ao concreto referência, para a mesma faixa de resistência à compressão, e para mesmas idades;
- h) a medida que a faixa de resistência à compressão foi aumentando, para as mesmas idades, o custo dos CAA foi ficando mais próximo do concreto referência, e, às vezes, inferior;
- i) sempre que possível, deve-se utilizar os traços 1:3 ou 1:4,5, para os CAA, já que estes apresentaram custos por MPa inferiores, se comparado aos traços mais pobres, para os CAA nas idades estudadas;
- j) a resistência à tração nos CAA é influenciada da mesma maneira que a resistência à compressão.

Sendo assim, após este trabalho, concluiu-se, principalmente, que o concreto auto-adensável pode substituir o concreto de trabalhabilidade convencional, ainda mais se for em obras especiais, pois o custo dos dois pode ser parecido, com todos os ganhos permitidos pelo CAA. Mas para se ter certeza se é economicamente vantajoso a substituição das misturas, deve ser feito um estudo global da situação, tentando mensurar todos os parâmetros do processo.

6.2 SUGESTÕES PARA FUTUROS TRABALHOS

Alguns pontos do CAA ainda estão em aberto, ou podem ser melhor esclarecidos em futuros trabalhos.

Deve-se estudar o teor ideal de argamassa do CAA. De um lado está toda a tecnologia dos concretos convencionais, que defende que se utilize o teor ideal, sem excessos nem falta. De outro, pesquisadores consagrados da área, que defendem um elevado teor de argamassa para o CAA.

Também deve-se fazer um estudo global comparativo do concreto convencional com o CAA. Sabe-se as inúmeras vantagens que o CAA proporciona, bem como um aumento de custo (nem sempre, a exemplo do trabalho experimental). Então, deve-se estudar uma obra real e tentar mensurar quantitativamente os benefícios do CAA. Somar o custo dos materiais mais a aplicação e comparar os dois tipos de concreto, para que se tenha certeza da viabilidade ou não da utilização do CAA.

Pode-se ainda estudar a durabilidade dos CAA, realizando ensaios de penetração de cloretos, absorção, carbonatação, teor de ar incorporado e outros. Se por um lado a presença de aditivos superplastificantes de terceira geração podem incorporar ar em excesso, prejudicando a durabilidade do concreto, por outro os finos tornam a estrutura mais densa.

Também é essencial que se dose CAA através de todos os métodos de dosagens existentes para tal, para que se possa determinar o mais econômico, o mais simples e eficiente.

REFERÊNCIAS

- AÏTCIN, P.C. **Concreto de alto desempenho**. Pini, São Paulo, 2000.
- AÏTCIN, P.C.; JOLICOEUR, C.; MACGREGOR, J.G. *Superplasticizers: how they work and why they occasionally don't*. In: **Concrete International**, p. 45-52, maio 1994.
- ALBUQUERQUE, A.S. Agregados. In: **Materiais de Construção, L.A Falcão Bauer**. Editora LTC, 5º edição, V.1, p.63-120, 2003.
- ALVES, M.F. **Estudo comparativo de métodos de dosagem para concretos de alta resistência**. Dissertação de mestrado, Porto Alegre, 2000.
- AMBROISE, J.; ROLS, S.; PÉRA, J. *Production and testing of self-leveling concrete*. In: **High Performance Concrete**. CD-ROM, p. 555-565, Gramado, 1999.
- ARAUJO, J.L.; BARBOSA, N.P.; DOS SANTOS, S.B; REGIS, P.A. Concreto auto-adensável com materiais locais no nordeste brasileiro. In: **45º CONGRESSO BRASILEIRO DO CONCRETO**. CD-ROM, Vitória, 2003.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE CIMENTO PORTLAND. **Guia básico de utilização do cimento Portland**. 3º ed. São Paulo, 1997.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5732**: cimento Portland comum. Rio de Janeiro, 1991a.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5733**: cimento Portland de alta resistência inicial. Rio de Janeiro, 1991b.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5735**: cimento Portland de alto-forno. Rio de Janeiro, 1991c.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5736**: cimento Portland pozolânico. Rio de Janeiro, 1991d.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5737**: cimento Portland resistente a sulfatos. Rio de Janeiro, 1992.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5739**: concreto – Ensaio de compressão de corpos-de-prova cilíndricos. Rio de Janeiro, 1994a.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6467**: agregados – Determinação do inchamento de agregado miúdo. Rio de Janeiro, 1987.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7222**: argamassa e concreto – Determinação da resistência à tração por compressão diametral de corpos-de-prova cilíndricos. Rio de Janeiro, 1994b.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7251**: agregado em estado solto – Determinação da massa unitária. Rio de Janeiro, 1982.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7810**: agregado em estado compactado e seco – Determinação da massa unitária. Rio de Janeiro, 1983.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 11578**: cimento Portland composto. Rio de Janeiro, 1991e.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 12989**: cimento Portland branco. Rio de Janeiro, 1993.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 13116**: cimento Portland de baixo calor de hidratação. Rio de Janeiro, 1991f.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR NM 18**: cimento Portland e outros materiais em pó – Determinação da massa específica. Rio de Janeiro, 2001a.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR NM 23**: cimento Portland – análise química - Determinação de perda ao fogo. Rio de Janeiro, 2004.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR NM 26**: agregados – Amostragem. Rio de Janeiro, 2001b.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR NM 33**: concreto – Amostragem de concreto fresco. Rio de Janeiro, 1998a.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR NM 52**: agregado miúdo – Determinação de massa específica e massa específica aparente. Rio de Janeiro, 2003a.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR NM 53**: agregado graúdo – Determinação de massa específica, massa específica aparente e absorção de água. Rio de Janeiro, 2003b.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR NM 67**: concreto – Determinação da consistência pelo abatimento do tronco de cone – método de ensaio. Rio de Janeiro, 1998b.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR NM 68**: concreto – Determinação da consistência pelo espalhamento na mesa de Graff. Rio de Janeiro, 1998c.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR NM 248**: agregados – Determinação da composição granulométrica. Rio de Janeiro, 2003c.

BARBOSA, M.P.; BOSCO, A.R.C.; BERTO, R.B.; SALLES, F.M. Um estudo das características e propriedades do concreto auto-adensável (CAA). **In: 44º CONGRESSO BRASILEIRO DO CONCRETO**. CD-ROM, Belo Horizonte, 2002.

BARTOS, P.J.M. *Measurement of key properties of fresh self-compacting concrete*. **In: CEN/STAR PNR Workshop**. Paris, 2000.

BARTOS, P.J.M.; SÖDERLIND, L. *Environment and ergonomics*. **In: Brite EuRam Program: Rational production and improved working environment through using self compacting concrete**. Task 8.5, p.1-31, 2000.

- BERNABEU. *Productivity and economy. In: Brite EuRam Program: Rational production and improved working environment through using self compacting concrete. Task 8.6, p.1-30, 2000.*
- BERNABEU; LABORDE. *Production system for civil engineering. In: Brite EuRam Program: Rational production and improved working environment through using self compacting concrete. Task 8.3, p.1-40, 2000.*
- BILLBERG, P. *Fine mortar rheology in mix design of SCC. In: 1st International RILEM Symposium on Self-Compacting Concrete. Suécia, p.47-58, 1999.*
- BOSILJKOV, V.B. *SCC mixes with poorly graded aggregate and high volume of limestone filler. In: Cement and Concrete Research, n. 33, p. 1279-1286, 2003.*
- BOSTRÖM, L. *Self-compacting concrete exposed to fire. In: 3rd International RILEM Symposium on Self-Compacting Concrete. Islândia, p.863-868, 2003.*
- BOUZOUBAÂ, N.; LACHEMI, M. *Self-compacting concrete incorporating high volumes of class F fly ash preliminary results. In: Cement and Concrete Research, n. 31, p. 413-420, 2001.*
- BUI, V.K.; MONTGOMERY, D.; HINCZAK, I.; TURNER, K. *Rapid testing method for segregation resistance of self-compacting concrete. In: Cement and Concrete Research, n. 32, p. 1489-1496, 2002.*
- BURY, M.A.; CHRISTENSEN, B.J. *The role of innovative chemical admixtures in producing self-consolidating concrete. In: First North American Conference on the Design and Use of Self-Consolidating Concrete, November 12-13, 2002.*
- CAMPION, M.J.; JOST, P. *Expanding the possibilities of concrete design and placement. In: Concrete International, p. 31-34, April 2000.*
- COLLEPARDI, M. *Self compacting concrete: what is new? In: Proceedings of 7th CANMET/ACI International Conference on Superplasticizers and Other Chemical Admixtures in Concrete, p.1-16, Outubro 20-24, 2003.*
- COLLEPARDI, M. *A very close precursor of self-compacting concrete (SCC). In: Supplementary volume of the Proceedings of Three-day CANMET/ACI International Symposium on Sustainable Development and Concrete Technology, Setembro 16-19, 2001.*
- COPPOLA, L. *Self-compacting concrete. In: Concrete Technology, p. 42-47, 2000.*
- DE LA PEÑA, B. *Hormigón autocompactante. In: Revista BIT, Junho, 2001.*
- DE LARRARD, F. *Concrete before casting: recent advances in concrete mixing and pumping technology. In: 5th EPUSP Symposium on Concrete Structures, São Paulo, Junho-2003.*
- DOMONE, P.L.J.; JIN, J. *Properties of mortar for self-compacting concrete. In: 1st International RILEM Symposium on Self-Compacting Concrete. Suécia, p.109-120, 1999.*

EUROPEAN FEDERATION FOR SPECIALIST CONSTRUCTION CHEMICALS AND CONCRETE SYSTEMS (EFNARC). *Specification and guidelines for self-compacting concrete*. In: **EFNARC**. Fevereiro, 2002.

FURNAS. Concreto – **determinação da habilidade de preenchimento do concreto auto-adensável utilizando-se o cone de Abrams (*slump flow test*)** – método de ensaio. **Manual de qualidade**, p.1-6, 2004a.

FURNAS. Concreto – **determinação da habilidade de preenchimento do concreto auto-adensável pelo método Kajima** – método de ensaio. **Manual de qualidade**, p.1-7, 2004b.

FURNAS. Concreto – **determinação da habilidade de preenchimento do concreto auto-adensável pelo método do funil V** – método de ensaio. **Manual de qualidade**, p.1-7, 2004c.

FURNAS. Concreto – **determinação das habilidades passante e de preenchimento do concreto auto-adensável pelo método da caixa L (*L-Box test*)** – método de ensaio. **Manual de qualidade**, p.1-7, 2004d.

FURNAS. Concreto – **determinação da habilidade de preenchimento do concreto auto-adensável pelo método orimet** – método de ensaio. **Manual de qualidade**, p.1-7, 2004e.

FURNAS. Concreto – **determinação da habilidade passante do concreto auto-adensável pelo método da caixa U (*U-Box test*)** – método de ensaio. **Manual de qualidade**, p.1-7, 2004f.

GIOVANNETTI, E. **Princípios básicos sobre concreto fluido**. Pini, Ibracon, São Paulo, 1999.

GOMES, P.C.C. *Optimization and characterization of high-strength self-compacting concrete*. Tese de doutorado, Barcelona, 2002.

GOMES, P.C.C.; GETTU, R.; AGULLÓ, L. Uma nova metodologia para obtenção de concretos auto-adensáveis de alta resistência com aditivos minerais. In: **V Simpósio EPUSP sobre Estruturas de Concreto**, p.1-14, 2003a.

GOMES, P.C.C.; GETTU, R.; AGULLÓ, L.; TENÓRIO, J.J.L. Concreto auto-adensável um aliado ao desenvolvimento sustentável do concreto. In: **45° CONGRESSO BRASILEIRO DO CONCRETO**, CD-ROM, Vitória, 2003b.

GRAUERS, M (coordinator). In: *Brite EuRam Program: Rational production and improved working environments through using self compacting concrete. 9 Tasks*, 1998.

HARTMANN, C.T. **Avaliação de aditivos superplastificantes base policarboxilatos destinados a concretos de cimento Portland**. Dissertação de mestrado, São Paulo, 2002.

HELENE, P.R.L. **Contribuição ao estabelecimento de parâmetros para dosagem e controle dos concretos de cimento Portland**. São Paulo, 1987. Tese (Doutorado) – Escola Politécnica Universidade de São Paulo.

HELENE, P.; TERZIAN, P. **Manual de dosagem e controle do concreto**. Pini, São Paulo, 1992.

- HO, D.W.S; SHEINN, A.M.M; TAM, C.T. *The sandwich concept of construction with SCC. In: Cement and Concrete Research*, n. 31, p. 1377-1381, 2001.
- HO, D.W.S; SHEINN, A.M.M; TAM, C.T. *The use of quarry dust for SCC applications. In: Cement and Concrete Research*, n. 32, p. 505-511, 2002.
- JACOBS, F.; HUNKELER, F. *Ecological performance of self compacting concrete. In: proceedings of 2nd International Symposium SCC*, p.715-722, 2001.
- KHAYAT, K.; GHEZAL, A. *Effect of viscosity-modifying admixture-superplasticizer combination on flow properties of SCC equivalent mortar. In: 3rd International RILEM Symposium on Self-Compacting Concrete*. Islândia, p.369-385, 2003.
- LACHEMI, M.; HOSSAIN, K.M.A.; LAMBROS, V.; NKINAMUBANZI, P.C.; BOUZOUBAË, N. *Performance of new viscosity modifying admixtures in enhancing the rheological properties of cement paste. In: Cement and Concrete Research*, 2453, 2003.
- LOWKE, D.; WIEGRINK, K.H.; SCHIESSL, P. *A simple and significant segregation test for SCC. In: 3rd International RILEM Symposium on Self-Compacting Concrete*. Islândia, p.356-366, 2003.
- MA, J.; DIETZ, J. *Ultra high performance self compacting concrete. In: Lacer*, n.7, p. 33-42, 2002.
- MBT. *Master Builders Technology. Visual Stability Index (VSI)*. Disponível em 12/06/2004 <<http://www.masterbuilders.com/eprise/main/MBT/Content/Products/Rheodynamic/VisualStabilityIndex>>.
- MBT. *Master Builders Technology. Manual Técnico*, edição 2003.
- MEHTA, P.K.; AİTCIN, P.C. *Principles underlying production of high-performance concrete. In: Cement, Concrete and Aggregates, CCAGDP*, Vol.12, n.12, p.70-78, 1990.
- NOGUCHI, T.; OH, S.G.; TOMOSAWA, F. *Rheological approach to passing ability between reinforcing bars of self compacting concrete*, 1999.
- NOOR, M.A.; UOMOTO, T. *Three-dimensional discrete element simulation of rheology tests of self-compacting concrete. In: 1st International RILEM Symposium on Self-Compacting Concrete*. Suécia, p.35-46, 1999.
- OKAMURA, H. *Self-compacting High-performance concrete. In: Concrete International*, v.19, n.7, p. 50-54, Julho 1997.
- OKAMURA, H.; OUCHI, M. *Self-compacting concrete. In: Journal of Advanced Concrete Technology*, Vol. 1, n. 1, p. 5-15, 2003.
- OBRAS. *La sagrada familia de Barcelona. In: Bettor MBT*, departamento técnico, n.2, julho 2000.
- OUCHI, M. *Self-compacting Concrete Development, applications and investigations*, 1999.

- OUCHI, M.; HIBINO, M. *Development, applications and investigations of self-compacting concrete*, 1999.
- PALMA, G. *Ensayos de trabajabilidad al hormigón autocompactante*. *Revista BIT*, Junho, 2001.
- PERSSON, B. *A comparison between mechanical properties of self-compacting concrete and the corresponding properties of normal concrete*. *In: Cement and Concrete Research*, n. 31, p. 193-198, 2001.
- PERSSON, B. *Internal frost resistance and salt frost scaling of self-compacting concrete*. *In: Cement and Concrete Research*, n. 33, p. 373-379, 2003.
- PETERSSSEN, Ö. *Preliminary mix-design*. *In: Brite EuRam Program: Rational production and improved working environment through using self compacting concrete*. Task 1, p.1-41, 1998.
- PETERSSSEN, Ö. *Workability*. *In: Brite EuRam Program: Rational production and improved working environments through using self compacting concrete*. Task 2, p.1-56, 1999.
- PETRUCCI, E.G.R. **Concreto de cimento Portland**. Globo, São Paulo, 1998.
- PROSKE, T.; GRAUBNER, C.A. – *Self-compacting concrete- pressure on formwork and ability to deaerate*. *In: Darmstadt Concrete*, n.17, 2002.
- RECENA, F.A.P. **Dosagem empírica e controle de qualidade de concretos convencionais de cimento Portland**. Edipucrs, Porto Alegre, 2002.
- RIGUEIRA VICTOR, J.W.; SERNA ROS, P.; PINTO BARBOSA, M.; MARTI VARGAS, J.R. *Utilização de modelos de ensaios reduzidos para a caracterização dos concretos auto-adensáveis*. *In: 45º CONGRESSO BRASILEIRO DO CONCRETO*. CD-ROM, Vitória, 2003.
- SAKAI, E.; YAMADA, K.; OHTA, A. *Molecular structure and dispersion-adsorption mechanisms of comb-type superplasticizers used in Japan*. *In: Journal of Advanced Concrete Technology*, Vol. 1, n. 1, p. 16-25, 2003.
- SHINDOH, T.; MATSUOKA, Y. *Development of combination-type self-compacting concrete and evaluation test methods*. *In: Journal of Advanced Concrete Technology*, Vol. 1, n. 1, p. 26-36, 2003.
- SÖDERLIND, L.; CLAESON, C. *Production system for housing*. *In: Brite EuRam Program: Rational production and improved working environment through using self compacting concrete*. Task 8.2, p.1-51, 2000.
- SONEBI, M.; BARTOS, P.J.M.; ZHU, W.; GIBBS, A. TAMIMI, A. *Properties of hardened concrete*. *In: Brite EuRam Program: Rational production and improved working environment through using self compacting concrete*. Task 4, p.1-73, 2000.
- SU, N.; HSU, K.C.; CHAI, H.W. *A simple mix design method for self-compacting concrete*. *In: Cement and Concrete Research*, n. 31, p. 1799-1807, 2001.

TORALLES-CARBONARI, M.B.; ELIAN, M.M.S.; CARBONARI, G. Influência da compacidade do esqueleto granular no consumo de pasta e nas propriedades do CAD. **In: V Simpósio EPUSP sobre Estruturas de Concreto**, p.1-12, 2003.

TROLI, R.; OLAGOT, J.J.O.; MONOSI, S.; COLLEPARDI, M. *Low heat development in self-compacting concretes for massive structure*. **In: Proceedings of 7th CANMET/ACI International Conference on Superplasticizers and Other Chemical Admixtures in Concrete**, p.103-112, Outubro 20-24, 2003.

TVIKSTA, L.G. *Quality control*. **In: Brite EuRam Program: Rational production and improved working environment through using self compacting concrete. Task 8.4**, p.1-28, 2000.

VANWALLEGHEM, H.; BLONTROCK, H.; TAERWE, L. *Spalling tests on self-compacting concrete*. **In: 3rd International RILEM Symposium on Self-Compacting Concrete**. Islândia, p.855-862, 2003.

VERÇOSA, E.J. Introdução. **In: Materiais de Construção, L.A Falcão Bauer**. Editora LTC, 5^o edição, V.1, p.1-10, 2003.

XIE, Y.; LIU, B.; YIN, J.; ZHOU, S. *Optimum mix parameters of high-strength self-compacting concrete with ultra pulverized fly ash*. **In: Cement and Concrete Research**, n. 32, p. 477-480, 2002.

ZHU, W.; BARTOS, P.J.M. *Permeation properties of self-compacting concrete*. **In: Cement and Concrete Research**, n. 33, p. 921-926, 2003.

ZHU, W.; GIBBS, J.C.; BARTOS, P.J.M. *Uniformity of in situ properties of self-compacting concrete in full-scale structural elements*. **In: Cement and Concrete Composites**, n. 23, p. 57-64, 2001.