



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

**INVESTIGAÇÃO DE MISTURAS DE ARGAMASSAS PARA DOSAGEM DO
CONCRETO AUTO-ADENSÁVEL CONTENDO ORA FÍLER CALCÁRIO,
ORA ADITIVO PROMOTOR DE VISCOSIDADE EM SUBSTITUIÇÃO AO
FÍLER**

*Mestranda: Zaira Fabrício Kraus
Orientador: Prof. Dr. Wellington Longuini Repette*

Florianópolis, setembro de 2006.

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA – UFSC
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL – PPGEC

**INVESTIGAÇÃO DE MISTURAS DE ARGAMASSAS PARA DOSAGEM DO
CONCRETO AUTO-ADENSÁVEL CONTENDO ORA FÍLER CALCÁRIO,
ORA ADITIVO PROMOTOR DE VISCOSIDADE EM SUBSTITUIÇÃO AO
FÍLER**

Dissertação submetida à Universidade Federal de Santa Catarina como requisito parcial exigido pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil - PPGEC, para a obtenção do Título de MESTRE em Engenharia Civil.

ZAIRA FABRÍCIO KRAUS

Orientador: Prof.º Dr. Wellington Longuini Repette

Florianópolis, setembro de 2006.

*Dedico este trabalho à minha família,
em especial, às minhas preciosidades
Samaira e Suellen, ao meu esposo Samiro
pelo carinho, doação e compreensão, e
aos meus pais, Zilda e Airto, pelo amor
incondicional.*

AGRADECIMENTOS

À concreteira Engemix, através do Eng. Joélcio, pela doação dos agregados.

À Votorantim Cimentos, na pessoa do Eng. Daniel Baldissera, pela doação do cimento.

À BASF S.A. Indústria Química, na pessoa do Eng. Paulo Santos, pela doação dos aditivos.

À Calfípar, nas pessoas dos Eng. Marcelo e Eng. Denir, pela doação do filer calcário.

Ao Eng. Humberto Benini, da Grace do Brasil pela realização dos de granulometria a laser do filer e cimento.

Ao PPGEC - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da UFSC, pela oportunidade de cursar este mestrado.

Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico - CNPq, pela bolsa de estudos concedida.

Aos técnicos do Laboratório de Materiais de Construção Civil – LMCC, Luiz e Renato, e ao funcionário Roque, pelos momentos de alegria e descontração durante a realização dos ensaios no laboratório.

Aos professores Dr. Luiz Roberto Prudêncio Jr., Dr. Philippe Jean Paul Gleize e Dra. Mônica Pinto Barbosa, por aceitarem participar da banca de avaliação deste trabalho.

Ao Prof.º Dr. Wellington Longuini Repette, pela sua orientação, atenção, amizade, paciência e disposição em todos os momentos necessários. Wellington, doutor dos doutores, muito obrigada!

Ao GTec - Grupo de Tecnologia em Materiais e Componentes à base de Cimento Portland, coordenado pelo Prof. Luiz Roberto Prudêncio Jr., pela oportunidade de poder fazer parte desse grupo e usufruir de sua infra-estrutura.

Aos colegas e amigos do GTec, pelos bons momentos de parceria e descontração.

Agradeço aos bolsistas do GTec, Washington, Wilson, Tarcísio, João e Maria Carolina, pela ajuda na confecção dos concretos, num rodízio noturno que mobilizou também os colegas de mestrado Aline, Gabi, Nadi e Daniel. Muito obrigada pessoal!

Aos colegas do mestrado, das disciplinas cursadas, em especial às amigas Nadieda e Gabriela pelos momentos prazerosos de laboratório e de estudo.

Ao bolsista de Iniciação Científica Wilson, pela amizade, participação e ajuda na parte experimental desta pesquisa. Muito obrigada!

Ao colega de mestrado Daniel, pela ajuda na parte experimental, na confecção dos concretos e capeamento dos corpos-de-prova.

Ao meu amigão Marcos, pela amizade, atenção, dedicação e ajuda incondicional, durante as noites e às vezes aos sábados. Marcos, muito obrigada!

À amigona Gabriela Gonçalves de Sousa, por sua amizade, doação, dedicação e prontidão em ajudar a qualquer hora ou em qualquer situação. Gabi, muito obrigada!

À minha amiga Karina, por muitos anos de amizade, companheirismo e alegria que tem proporcionado.

Aos meus pais, Zilda Luiz Fabrício e Airto Antônio Fabrício pelo amor incondicional e pelo seus exemplos de vida, de persistência e honestidade, que serei eternamente grata pelo investimento em mim para que eu conseguisse estudar. E aos meus irmãos: Zenilda, Amarildo e Zanei pelo carinho de todos.

À minha família, que aumentou no decorrer deste mestrado, ampliando a minha alegria e me completando a todos os momentos. Agradeço a Deus pela minha família, às minhas filhas Samaira e Suellen, razões do meu viver, e ao meu esposo Samiro pelo seu amor, atenção, compreensão e companheirismo. Amo muito vocês!

A Deus que me deu a vida e que me guia em todos os momentos para os caminhos do bem.

*“A maior conquista do homem é a sua
capacidade em aprender.”*

Anônimo

RESUMO

Com o aumento das exigências na concretagem de elementos com elevada complexidade estrutural, e com o objetivo de assegurar maior durabilidade às construções, surgiu no Japão, em 1986, o inovador concreto auto-adensável (CAA). Este concreto caracteriza-se pela capacidade de se mover no interior das fôrmas em função de seu peso próprio, passando entre espaços estreitos sem segregar, dispensando assim a necessidade de vibração em virtude do seu auto-adensamento. Atendendo a essas características, apresentou-se uma pesquisa que se baseia num estudo fatorial em argamassas auto-adensáveis, a fim de se analisar diversas dosagens de CAA. A concretização desta pesquisa conduz à confecção de argamassas e concretos auto-adensáveis, empregando materiais da região da Grande Florianópolis associados com dois promovedores de viscosidade, em diferentes etapas: ora adição de filer calcário e ora aditivo promotor de viscosidade. Foram variados nas argamassas os teores de agregado miúdo, teores de filer, relação água/cimento e os teores de aditivos (promotor de viscosidade e superplastificante de base policarboxilato). A finalidade foi selecionar os traços mais apropriados, através dos ensaios de espalhamento e funil-V, avaliar a equivalência destas argamassas com seus respectivos concretos auto-adensáveis e averiguar o emprego do aditivo promotor de viscosidade (APV). Para a produção dos concretos auto-adensáveis encontrou-se o teor adequado de agregado graúdo e ajustaram-se os teores de aditivos superplastificantes. Desse modo, verificou-se suas propriedades de auto-compactabilidade no estado fresco através do espalhamento, fluidez, passagem por restrições e de capacidade de preenchimento e nivelamento, por meio dos ensaios de espalhamento, funil-V, caixa-L e caixa-U; e suas propriedades mecânicas através da resistência à compressão e módulo de elasticidade aos 28 dias. O presente estudo visou, assim, obter um CAA com resistências usuais e aprimorar o método de dosagem Repette-Melo, baseado no estabelecimento da resistência à compressão, tendo em vista o emprego de uma adição inerte e o aditivo promotor de viscosidade, com intuito de obter um CAA economicamente viável e promover sua maior empregabilidade.

ABSTRACT

Self-Compacting Concrete (SCC) was first developed in Japan around 1986 so that durability of concrete structures could be improved. SCC is an innovative concrete that does not require vibration for placing and compaction. It is able to flow under its own weight, completely filling formwork and achieving full compaction, even in the presence of congested reinforcement.

This research is based on a factorial study of self-compacting mortars, in order to analyze several mix compositions of SCC. It was used materials from “Grande Florianópolis” associated with two viscosity additions: addition of limestone filler and viscosity modifying admixture (VMA), in different stages.

The proportioning of fine aggregate, filler, water-cement ratio, VMA and polycarboxylate-based superplasticizer was varied in the mortars with the objectives of selecting the most appropriate mix through of slump flow and funnel-V tests, evaluating the equivalence of these mortars with their respective SCC and testing the applicability of VMA.

The appropriate aggregate and superplasticizer ratio in the mix were adjusted for the manufacturing the SCC, verifying its properties of self-compactibility in the fresh mix through the flow, fluidity, passage for restrictions and of filling capacity, based on the slump flow, and funnel-V, L-box and U-box tests, and its mechanical properties through the strength and module of elasticity tests.

The aim of this study was to obtain a SCC with usual resistances and to improve the Repette-Melo dosage method; based on the definition of strength, considering use of an inert mineral admixture and the VMA. The main intention was to obtain a SCC economically viable and to promote its applicability.

SUMÁRIO

LISTA DE ABREVIACOES	xii
LISTA DE TABELA	xiv
LISTA DE FIGURA	xv
1 INTRODUÇÃO	17
1.1 Considerações Iniciais	17
1.2 Justificativa	17
1.3 Objetivos	19
2 CONCRETO AUTO-ADENSÁVEL	21
2.1 Definição	21
2.2 Desenvolvimento	21
2.3 Vantagens	24
2.4 Desvantagens	25
2.5 Aplicação	26
2.6 Estado Fresco	28
2.6.1 Comportamento reológico	28
2.6.1.1 Fatores que afetam a reologia do concreto	32
2.6.1.2 Distanciamento mínimo entre as partículas de agregados	33
2.6.2 Propriedades Fundamentais	35
2.6.2.1 Capacidade de preenchimento	35
2.6.2.2 Capacidade de passar por espaços estreitos	36
2.6.2.3 Resistência  segregação	36
2.7 Estado Endurecido	38
2.8 Materiais Constituintes	38
2.8.1 Cimento	39
2.8.2 Adições	40
2.8.2.1 Fíler mineral	40
2.8.2.2 Cinza Volante	41
2.8.2.3 Sílica-ativa	41
2.8.2.4 Escória granulada de alto forno	41
2.8.2.5 Outras adições	42
2.8.3 Agregados	42
2.8.3.1 Agregado graúdo	42
2.8.3.2 Agregado miúdo	44
2.8.4 Aditivos	44
2.8.4.1 Superplastificante	44
2.8.4.2 Promotor de Viscosidade	49
2.8.5 gua	53
2.9 Ensaio Correntes em Concretos Auto-Adensáveis	53
2.10 Espalhamento (Slump Flow) e T500	54
2.10.1 Funil-V	54
2.10.2 Caixa-L	55
2.10.3 Caixa-U	56
2.10.4 Orimet	57
2.10.5 Anel japonês	57
2.10.6 Orimet e Anel japonês	58
2.10.7 Critérios de aceitação do CAA	58
2.11 Ensaio Correntes em Argamassas	59

2.12	Métodos de Dosagem	60
2.12.1	Princípios de dosagem	60
2.12.2	Considerações.....	62
2.12.3	Estratégias de dosagem	62
2.12.4	Método proposto por Okamura et al. (1997).....	63
2.12.5	Método proposto por Sedran et al. (1996)	65
2.12.6	Método proposto por Gomes (2002)	66
2.12.7	Método proposto pela CBI (2002).....	67
2.12.8	Método Repette-Melo (2005).....	67
2.12.9	Análise Crítica dos Métodos Descritos.....	68
2.12.10	Faixas de proporção dos materiais propostas na literatura	70
3	MATERIAIS E METODOLOGIA	71
3.1	Seleção e Caracterização dos Materiais	72
3.1.1	Cimento	72
3.1.2	Filer calcário.....	73
3.1.3	Aditivos.....	74
3.1.3.1	Superplastificante.....	74
3.1.3.2	Promotor de Viscosidade	75
3.1.4	Agregados	75
3.1.4.1	Agregado miúdo	75
3.1.4.2	Agregado graúdo.....	75
3.2	Ensaio Realizados em Argamassas.....	77
3.2.1	Espalhamento (<i>Slump Flow</i>)	77
3.2.2	Fluidez (Funil-V).....	78
3.2.3	Massa Específica das Argamassas.....	79
3.2.4	Teor de Ar Incorporado	79
3.2.5	Tempo de início do aumento de temperatura das argamassas	79
3.2.6	Resistência à compressão.....	81
3.3	Confecção das Argamassas Auto-Adensáveis.....	81
3.3.1	Definição dos parâmetros experimentais de mistura de argamassas.....	87
3.4	Confecção dos Concretos Auto-Adensáveis.....	89
3.4.1	Ensaio Utilizados em CAA.....	91
3.4.1.1	Espalhamento (<i>Slump flow</i>).....	91
3.4.1.2	Tempo de escoamento (Funil-V).....	92
3.4.1.3	Capacidade de preenchimento e resistência ao bloqueio (caixa-L e caixa-U).....	93
3.4.1.4	Massa Específica dos Concretos.....	93
3.4.1.5	Resistência à compressão	94
3.4.1.6	Módulo de elasticidade	94
3.4.2	Avaliação da Auto-Compactibilidade.....	94
4	APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS	96
4.1	Argamassas	96
4.1.1	Teor de agregado miúdo	96
4.1.2	Teor de filer.....	97
4.1.3	Teor de aditivo superplastificante e Fluidez das argamassas.....	98
4.1.4	Teor de aditivo promotor de viscosidade.....	108
4.1.5	Perda de fluidez com o tempo	109
4.1.6	Massa específica e teor de ar aprisionado.....	110
4.1.7	Tempo de início do aumento de temperatura.....	112
4.1.8	Resistência à compressão.....	117

4.1.8.1	Análise da superfície acabada das argamassas no estado endurecido	122
4.2	Estudo em concreto e suas correlações com as argamassas equivalentes	123
4.2.1	Teor de agregado graúdo.....	125
4.2.2	Influência do equipamento de mistura.....	126
4.2.3	Proporcionamento dos materiais	126
4.2.4	Teor de Aditivo Superplastificante.....	129
4.2.5	Influência do modo de ajuste do CAA.....	133
4.2.6	Teor de Aditivo Promotor de Viscosidade.....	135
4.2.7	Teor de Filer.....	135
4.2.8	Massa específica e teor de vazios.....	136
4.2.9	Resistência à compressão.....	138
4.2.9.1	Análise da superfície acabada dos corpos de prova.....	139
4.2.10	Segregação	139
4.2.11	Módulo de elasticidade	140
4.2.12	Diagrama de dosagem.....	141
4.2.13	Sugestões para a Complementação do Método Repette-Melo.....	144
5	CONCLUSÕES	147
5.1	Proposição para Estudos Complementares	149
6	REFERÊNCIAS.....	150

LISTA DE ABREVIACOES

AIJ - Instituto de Arquitetos do Japo

APV - Aditivo promotor de viscosidade

arg. – Argamassa

a/c – Relaco gua/cimento

a/f – Relaco gua/slidos

a/s – Relaco gua/finos

CAA - Concreto auto-adensável

CBI - Swedish Cement and Concrete Research Institute

CFT - Concrete Filled Tubes

concr. – Concreto

EPS - Poliestireno Expandido

EFCA - European Federation of Concrete Admixtures Associations

EFNARC - European Federation of Producers and Contractors of Specialist Products for Structures

EFNARC - Federao Européia de Fabricantes de Produtos Especiais para Estruturas

F - Filer

$\Gamma_m = G_m$ - Diâmetro de espalhamento relativo

LMCC - Laboratrio de Materiais de Construo Civil

NBR - Norma Brasileira

NM – Norma Mercosul

η – viscosidade plástica

PCI - Instituto do Concreto Pré-fabricado

JSCE - Sociedade de Engenheiros Civis do Japo

RILEM - Réunion Internationale des Laboratoires d'Essais et de Recherches sur les Matériaux et les Constructions

Rm - Tempo de escoamento relativo

SP - Aditivo superplastificante à base de policarboxilatos

NC - Não conforme

τ_0 - Tensão de escoamento

UFSC - Universidade Federal de Santa Catarina

VMA - Aditivo modificador de viscosidade (Aditivo promotor de viscosidade)

LISTA DE TABELA

Tabela 1	- Possíveis medidas de correção a partir da identificação de falhas (EFNARC, 2002).	37
Tabela 2	- Faixas de resultados para a avaliação do CAA em termos de deformabilidade e resistência ao bloqueio.	59
Tabela 3	- Faixas de proporção dos materiais para CAA propostas na literatura	70
Tabela 4	- Características físicas e químicas do CPV-ARI RS da marca Votoran.	72
Tabela 5	- Características do filer calcário.	73
Tabela 6	- Características dos aditivos aplicados.	74
Tabela 7	- Características dos agregados miúdo e graúdo.	76
Tabela 8	- Limites de aceitação da argamassa auto-adensável encontrados na literatura, de acordo com o método de ensaio.	77
Tabela 9	- Proporcionamentos das misturas com filer.	83
Tabela 10	- Proporcionamentos das misturas com aditivo promotor de viscosidade.	84
Tabela 11	- Proporcionamentos das misturas com aditivo promotor de viscosidade em substituição ao filer.	85
Tabela 12	- Traço testado com areia úmida e areia seca.	88
Tabela 13	- Traço testado com areia úmida, sem e com frações de acréscimos.	89
Tabela 14	- Limites de aceitação do CAA de acordo com o método de ensaio.	95
Tabela 15	- Argamassas com filer, ensaios de auto-compactabilidade e resistência à compressão.	99
Tabela 16	- Argamassas com APV, ensaios de auto-compactabilidade e seus parâmetros.	100
Tabela 17	- Argamassas com APV em substituição a 25 % de filer, ensaios de auto-compactabilidade e seus parâmetros.	101
Tabela 18	- Argamassas com filer e suas massas específicas e teores de ar incorporado.	111
Tabela 19	- Argamassas APV e suas massas específicas e teores de ar incorporado.	112
Tabela 20	- Argamassas APV em substituição ao filer e suas massas específicas e teores de ar incorporado.	112
Tabela 21	- Argamassas da série com filer e o tempo de início do aumento da temperatura.	113
Tabela 22	- Argamassas da série com APV e o tempo de início do aumento da temperatura.	116
Tabela 23	- Argamassas da série com APV e o tempo de início da evolução de temperatura.	117
Tabela 24	- Resultados da resistência à compressão das argamassas com filer.	118
Tabela 25	- Resultados da resistência à compressão das argamassas com APV.	119
Tabela 26	- Resultados da resistência à compressão das argamassas com APV em substituição ao filer.	119
Tabela 27	- Relações a/c das argamassas conformes com filer, 40% e 45% areia.	123
Tabela 28	- Relações a/c das argamassas conformes com filer e 50% areia e com APV.	124
Tabela 29	- Determinação do teor ideal de agregado graúdo.	125
Tabela 30	- Influência do tipo de misturador no espalhamento do CAA.	126
Tabela 31	- Traços unitários dos concretos auto-adensáveis em massa.	126
Tabela 32	- Proporcionamento dos materiais constituintes dos CAAs, em volume.	127
Tabela 33	- Proporcionamento dos materiais constituintes dos CAAs, em massa.	128
Tabela 34	- Teor de SP e os resultados dos ensaios de auto-compactabilidade do CAA.	129
Tabela 35	- Teores de superplastificantes encontrados nos CAAs e suas relações com os teores das argamassas.	131
Tabela 36	- Diferentes formas de se ajustar e reajustar o CAA.	134
Tabela 37	- Características das misturas com aditivo promotor de viscosidade.	135
Tabela 38	- Características das misturas com filer calcário.	136
Tabela 39	- Massa específica e teor de vazios dos concretos executados.	137
Tabela 40	- Resultados de módulo de elasticidade experimental e estimado (NBR 6118:2004).	141

LISTA DE FIGURA

Figura 1	- Representação de um fluido com comportamento binghamiano e outro newtoniano. ...	29
Figura 2	- Faixas referenciais de valores de tensão de escoamento e viscosidade plástica para o CAA segundo Wallevik, 2003.....	30
Figura 3	- Influência da quantidade de água e do teor de superplastificante nas propriedades da suspensão da pasta (KORDTS e DÜSSELDORF , 2003).....	31
Figura 4	- Efeito dos materiais do concreto sobre a tensão de escoamento e a viscosidade plástica (CORRADI, 2003).	32
Figura 5	- Quantidade de pasta necessária para promover a dispersão dos agregados.	34
Figura 6	- Mecanismo de bloqueio na passagem da seção reduzida (TAKATA e TANGTERMSIRIKUL, 2000, apud WÜSTHOLZ, 2003).	36
Figura 7	- Representação esquemática do polímero sulfonado (SNF) e o do seu mecanismo de atuação nas partículas de cimento (COLLEPARDI, 2003).	45
Figura 8	- Distância entre os grãos de cimento promovida pela atuação do aditivo a base de polímeros sulfonados (Manual técnico - Sika).	45
Figura 9	- Representação esquemática do policarboxilato e de seu mecanismo de atuação nas partículas de cimento (COLLEPARDI, 2003).	46
Figura 10	- Distância entre os grãos de cimento promovida pela atuação do aditivo de base policarboxilato (Manual técnico - Sika).	47
Figura 11	- Flocculação e desfloculação das partículas de cimento (NUNES, 2001).	47
Figura 12	- Comportamento do espalhamento de um CAA no tempo com dosagem adicional após 60 minutos (KORDTS e DÜSSELDORF, 2003).	48
Figura 13	- Influência da variação de água na modificação do <i>slump flow</i> (DOMONE, 2005).....	50
Figura 14	- Ensaio de espalhamento e T_{500} , respectivamente.	54
Figura 15	- Ensaio e dimensões do Funil-V.	55
Figura 16	- Ensaio e dimensões da caixa-L.	56
Figura 17	- Ensaio da caixa-U e suas dimensões.	57
Figura 18	- Ensaio de Orimet.	57
Figura 19	- Anel japonês.	58
Figura 20	- Ensaio de Orimet e anel japonês em conjunto.	58
Figura 21	- Cone usado para o ensaio de espalhamento em argamassa.....	59
Figura 22	- Funil-V para ensaio de fluidez em argamassa.	60
Figura 23	- Metodologia de dosagem proposta por Okamura et al (NUNES, 2001).....	64
Figura 24	- Metodologia de dosagem para o CAA de Alta Resistência proposta por Gomes, 2002... ..	66
Figura 25	- Faixas de espalhamento e tempo de escoamento propostas por Okamura (1997) e Edamatsu et al. (1999), (KORDTS, 2005).	68
Figura 26	- Fluxograma do Método Repette-Melo (MELO, 2005).	68
Figura 27	- Curva granulométrica do cimento e do filer.	73
Figura 28	- Distribuição dos tamanhos das partículas de cimento e filer calcário.	74
Figura 29	- Curvas granulométricas dos agregados.....	76
Figura 30	- Cone metálico (a) para ensaio de espalhamento (<i>slump flow</i>) em argamassa(b).	78
Figura 31	- Funil-V para argamassas.	78
Figura 32	- Molde metálico cilíndrico de volume conhecido.	79
Figura 33	- Ensaio para a determinação do tempo de pega das argamassas.....	80
Figura 34	- Fluxograma das argamassas auto-adensáveis com filer.....	83
Figura 35	- Fluxograma das argamassas auto-adensáveis com APV.	84
Figura 36	- Critério de análise dos parâmetros de conformidade das argamassas e seus ensaios.	86
Figura 37	- Misturador escolhido para a confecção dos concretos.	90
Figura 38	- Parâmetros verificados no concreto auto-adensável.	91
Figura 39	- Ensaio de espalhamento para o CAA.....	92
Figura 40	- Funil-V de concreto com vistas superior, frontal e lateral.	92

Figura 41 - Caixa-U e caixa-L.....	93
Figura 42 - Molde metálico cilíndrico de concreto.....	94
Figura 43 - Influência dos teores de agregado miúdo e filer nas misturas de argamassa.....	96
Figura 44 - Relação entre área de espalhamento e tempo de escoamento relativos para argamassas com filer e APV.....	102
Figura 45 - Comportamento do aditivo SP com o aumento do teor de filer, para argamassas com 40% areia.....	103
Figura 46 - Comportamento do aditivo SP com o aumento do teor de filer, para argamassas com 45% areia.....	104
Figura 47 - Conteúdo de água necessário para a conversão das partículas sólidas em suspensão (KORDTS e BREIT, 2003).....	105
Figura 48 - Comportamento do aditivo SP com o aumento do teor de filer, para argamassas com 50% areia.....	106
Figura 49 - Teor do aditivo SP com o aumento do teor de APV para argamassas auto-adensáveis.....	107
Figura 50 - Teor do aditivo SP com o aumento do teor de filer, para argamassas com APV em substituição ao filer para argamassas auto-adensáveis.....	107
Figura 51 - Variação dos teores de aditivos promotores de viscosidade para as argamassas desta série.....	108
Figura 52 - Perda de fluidez de uma argamassa com o tempo.....	110
Figura 53 - Curvas da evolução de temperatura das argamassas com filer e 50% areia.....	114
Figura 54 - Tempo de início da liberação de calor das argamassas com filer.....	115
Figura 55 - Tempo de início da liberação de calor das argamassas com APV.....	116
Figura 56 - Resistência à compressão das argamassas com filer e 40 % areia.....	120
Figura 57 - Resistência à compressão das argamassas com filer e 45 % areia.....	120
Figura 58 - Resistência à compressão das argamassas com filer e 50 % areia.....	121
Figura 59 - Resistência à compressão das argamassas com APV e 50 % areia.....	121
Figura 60 - Resistência à compressão das argamassas com APV em substituição ao filer.....	122
Figura 61 - Diferença do teor de SP na argamassa e no CAA com APV.....	131
Figura 62 - Diferença do teor de SP na argamassa e no CAA com filer e 40% areia.....	132
Figura 63 - Diferença do teor de SP na argamassa e no CAA com filer e 50% areia.....	132
Figura 64 - Diferença do teor de SP na argamassa e no CAA com filer e 45% areia e a substituição por APV.....	133
Figura 65 - Teor de vazios das argamassas e concretos equivalentes.....	137
Figura 66 - Resistência à compressão dos CAAs e suas respectivas argamassas.....	138
Figura 67 - Concreto rompido com filer e 40% de areia na argamassa.....	139
Figura 68 - Concreto rompido com APV e 50% de areia na argamassa.....	140
Figura 69 - Diagrama de dosagem para CAA com 35 % de filer e 40 % de areia na argamassa.....	142
Figura 70 - Diagrama de dosagem para CAA com 0,30 % de APV e 50 % areia na argamassa.....	143
Figura 71 - Teor de superplastificante otimizado para misturas com filer e APV.....	144
Figura 72 - Fluxograma racionalizado deste estudo para complementação do método Repette-Melo de dosagem com filer.....	145
Figura 73 - Fluxograma racionalizado deste estudo para a complementação do método Repette-Melo de dosagem com APV.....	145

1 INTRODUÇÃO

1.1 Considerações Iniciais

O concreto auto-adensável (CAA) é caracterizado, fundamentalmente, pela sua capacidade de se mover no interior das fôrmas, preenchendo todos os espaços existentes entre as armaduras em função de seu peso próprio. Também deve apresentar resistência à segregação e capacidade de passar entre espaços estreitos, dispensando dessa maneira a necessidade de vibração. Entretanto, com o intuito de contribuir com os estudos do CAA, esta pesquisa vem analisar algumas de suas propriedades com a utilização do aditivo promotor de viscosidade (APV), confeccionado com materiais da região da Grande Florianópolis. Partiu-se de um estudo prévio em argamassas para verificar sua possível correlação com o concreto executado proveniente destes mesmos traços de argamassas auto-adensáveis.

1.2 Justificativa

Os assuntos relacionados com a durabilidade do concreto têm constituído motivo de grande interesse por parte da comunidade científica, em virtude dos custos elevadíssimos de reparação e reabilitação das estruturas de concreto armado. Porém, a durabilidade das estruturas de concreto retrata geralmente o resultado da qualidade da produção. As dificuldades de colocação do concreto, como é o caso da vibração em zonas densamente armadas refletem-se, cada vez mais, nos requisitos que se colocam ao concreto correspondendo a níveis de exigência mais elevados (NUNES, 2001).

O adensamento do concreto fresco é um elemento fundamental da construção das estruturas de engenharia civil, pois deverá fornecer boa consolidação, propriedades uniformes, baixo conteúdo de vazio, elevada aderência concreto/armadura e, por fim, boa superfície de acabamento. Neste caso, a consolidação do concreto assegura resistência e durabilidade da estrutura. As técnicas de adensamento avançaram durante os anos, mas o processo ainda é complicado em áreas da estrutura com congestionamento de armadura e fôrmas complexas (ACI Comitê 309, 1990 apud GOMES, 2002).

Em geral, a maior parte do concreto empregado atualmente na construção civil, exige adensamento forçado para atingir grande compatibilidade compatível com as resistências e durabilidade requeridas. O método de adensamento mais disseminado é a vibração do concreto fresco por meio de agulha de imersão no interior das fôrmas. Contudo, a vibração

provoca atrasos e custos acrescidos. Além disso, poderá gerar problemas de saúde tanto para as pessoas da obra, bem como, da zona circundante do local de construção (NUNES, 2001).

O concreto convencional frente ao CAA necessita de mão-de-obra qualificada e supervisionada, maiores gastos com operários em decorrência de um número elevado de trabalhadores envolvidos na concretagem e vibração do concreto e conseqüentemente condição de trabalho insalubre advinda do nível elevado de ruído do equipamento de vibração.

Para evitar os problemas associados com o adensamento, o concreto auto-adensável foi criado com o objetivo de propiciar um concreto de boa qualidade e estruturas duráveis sem depender de equipamento de adensamento e trabalhadores experientes. Tal concreto poderia ser capaz de preencher a fôrma, atravessando a armadura sem bloqueio e consolidando-se sob a ação de seu próprio peso (GOMES, 2002).

Isso possibilitou a confecção e aplicação de misturas mais trabalháveis, que podem ser empregadas mais rapidamente e com segurança. Para um mesmo desempenho, o construtor apreciará misturas mais trabalháveis, que requerem menor tempo e esforço e, conseqüentemente, menor custo de lançamento (GIOVANNETTI, 1989).

A elevada fluidez, facilidade de lançamento e aplicação estão atreladas à utilização dos aditivos em concretos produzidos recentemente, sendo o seu uso quase que indispensável, sobretudo nos concretos especiais. No caso do CAA, o emprego destes faz-se condição imprescindível para sua elaboração, a fim de se obter as características reológicas desejadas.

Emprega-se aditivo superplastificante para garantir maior fluidez para a redução da tensão de escoamento e, por vezes, aditivo promotor de viscosidade, para manter uma viscosidade adequada.

O aditivo promotor de viscosidade é um componente de fácil aquisição no mercado utilizado no CAA, e por assim dizer, este trabalho investigará o seu uso como agente promovedor da viscosidade, sem outras adições de finos, em misturas de argamassas e concretos auto-adensáveis em conjunto com os agregados disponíveis na região da Grande Florianópolis.

Diante das várias deficiências encontradas com a aplicação do concreto convencional nas estruturas de concreto em geral, faz-se necessária à procura e investigação de outras tecnologias que permitam suprir as carências geradas por um processo estagnado que apresenta sempre as mesmas falhas e sem soluções eficazes para a extinção do problema.

Então, só resta buscar outra tecnologia e erradicar o problema definitivamente e ainda usufruir de uma série de vantagens que o concreto, como o CAA oferece.

Para que a disseminação do CAA ocorra com maior intensidade e satisfação é preciso que este seja investigado e estudado com vistas ao uso de um método racional e econômico de dosagem.

Dessa maneira, pretende-se com este trabalho implementar e aprimorar o método de dosagem Repette-Melo, que leva em consideração a relação água/cimento para atender a resistência desejada, a fim de racionalizar o método e otimizar o proporcionamento dos materiais.

Com base no mesmo princípio, propõe-se a investigação do aditivo promotor de viscosidade (APV), sem a utilização de filer, através do estudo fatorial em argamassas com o intuito de fornecer faixas otimizadas de teores dos materiais, na sua maioria da região de Florianópolis para componentes do CAA, e também verificar a viabilidade da substituição do filer pelo APV numa etapa do trabalho em argamassas e posteriormente implementá-la no seu concreto equivalente.

Considerando que o CAA necessita de uma seleção mais criteriosa quanto à escolha dos materiais para sua confecção em relação ao concreto convencional, pretende-se ensaiar e avaliar diferentes componentes responsáveis pela viscosidade da mistura, como o filer calcário e o APV. Buscou-se assim, utilizar e avaliar produtos de fácil obtenção na região da pesquisa, com baixo custo e alta disponibilidade.

1.3 Objetivos

Este trabalho tem por objetivo principal avaliar e comparar misturas de concreto desenvolvidas a partir de estudos preliminares em argamassas auto-adensáveis, com adição de filer calcário e aditivo promotor de viscosidade, buscando-se a racionalização e a otimização da dosagem do CAA. Os objetivos específicos seguem listados abaixo:

- Caracterizar e verificar o emprego dos materiais utilizados para a confecção das argamassas e concretos auto-adensáveis;
- Analisar as misturas obtidas por meio de um programa fatorial de experimentos em argamassas para, a partir desse, desenvolver os traços de concretos auto-adensáveis;
- Avaliar o comportamento das argamassas e concretos auto-adensáveis, bem como os ensaios utilizados para a caracterização das misturas no estado fresco;

- Selecionar as dosagens mais econômicas que atendam o melhor desempenho técnico para a produção do CAA, visando atingir resistências usuais do concreto;
- Recomendar procedimentos para a otimização da dosagem do concreto auto-adensável através do método Repette-Melo, implementando a dosagem com o uso de aditivo promotor de viscosidade.

2 CONCRETO AUTO-ADENSÁVEL

2.1 Definição

Um dos precursores do concreto auto-adensável - o professor Okamura, da Universidade de Tóquio - define este como sendo um concreto capaz de fluir no interior da fôrma, preenchendo de forma natural o volume da mesma, passando entre as barras da armadura e consolidando-se sob a ação de seu próprio peso, sem métodos internos ou externos de adensamento (OKAMURA, 1997).

Para a *European Federation of Producers and Contractors of Specialist Products for Structures* - EFNARC (2005) o concreto auto-adensável é um tipo de concreto inovador que não requer vibração alguma para sua colocação e adensamento. O CAA flui pela ação de seu próprio peso, preenche as fôrmas completamente e atinge adensamento pleno, até mesmo na presença de congestionamento de armadura.

O CAA promove, no estado fresco, uma aplicação quase que autônoma, fácil, cômoda e segura e no estado endurecido distingui-se pela elevada qualidade. Portanto, contribui para a rapidez na execução das obras e durabilidade das estruturas de concreto.

A EFNARC (2005) destaca ainda que o concreto auto-adensável oferece uma rápida adaptação à fôrma, diminui o prazo de construção e diminui os problemas de colocação pela alta densidade de armadura. A fluidez e a resistência à segregação do CAA asseguram um bom nível de homogeneidade, uma porosidade mínima no concreto e uma resistência constante, proporcionando melhores níveis de acabamento e uma maior durabilidade da estrutura.

2.2 Desenvolvimento

De acordo com Okamura e Ouchi (2003), o problema da durabilidade das estruturas de concreto foi o tópico de maior interesse no Japão, em 1983, problema este que vinha desagradando os engenheiros japoneses durante anos. Contudo, a redução gradual no número de trabalhadores qualificados na indústria da construção no Japão conduziu a uma diminuição semelhante na qualidade do trabalho na construção.

Nesse sentido, uma solução para a realização de estruturas de concreto mais duráveis, de forma a amenizar a influência da mão-de-obra no lançamento e adensamento do concreto é

o emprego de concreto auto-adensável, o qual se auto-adensa em toda a fôrma, puramente por meio de seu próprio peso e exime a necessidade de vibração (OKAMURA e OUCHI, 1999).

O uso deste tipo de concreto foi proposto por Okamura em 1986. Estudos para desenvolver o concreto auto-adensável foram realizados por Ozawa e Maekawa na Universidade de Tóquio. O protótipo de concreto auto-adensável terminou já em 1988 utilizando materiais do mercado. O protótipo comportou-se satisfatoriamente com respeito à retração por secagem e endurecimento, calor de hidratação e outras propriedades. Esse concreto foi denominado “Concreto de Alto Desempenho” e definido como segue nos três estágios do concreto (OKAMURA e OUCHI, 1999):

- 1º) Estado Fresco: auto-adensável;
- 2º) Primeiras idades: livre de defeitos;
- 3º) Estado endurecido: proteção contra fatores externos.

Quase no mesmo momento, “Concreto de Alto Desempenho” foi definido pelo professor Aïtcin como um concreto com alta durabilidade devido à baixa relação água/cimento. Desde então, o termo concreto de alto desempenho foi usado ao redor do mundo referindo-se ao concreto de alta durabilidade.

Por esta razão, Okamura mudou o termo do concreto proposto para “self-consolidating concrete” (designação ainda frequentemente utilizada na América do Norte). No entanto, esta designação foi substituída por “self-compacting concrete” (concreto auto-adensável), tendo em vista, que a característica mais proeminente deste material, enquanto fresco, é a sua capacidade de preencher todos os espaços do interior da fôrma pela ação do seu peso próprio, e o termo auto-adensável traduz isto de uma forma mais realista. Este termo disseminou-se, sendo hoje em dia a designação mais usada (NUNES, 2001).

Desde então, a importância dada ao CAA pelos engenheiros e pesquisadores vem crescendo no meio técnico e científico. Isso se reflete ao estudá-lo intensamente, abordando suas principais características, propriedades no estado fresco e endurecido, seu desenvolvimento, métodos de dosagem, tipos de adições, desempenho das diferentes misturas, avaliação dos diversos tipos de ensaios e outros fatores relacionáveis com o CAA.

Percebe-se, atualmente, que sua abrangência expande-se a cada dia pelos diversos países do mundo, pois o CAA é um tipo de concreto que oferece muitas vantagens, benefícios e um vasto campo de aplicação, o que desperta o interesse das comunidades científicas, técnica e dos profissionais do setor da construção civil.

Hoje, existem vários segmentos dentro da área do CAA que estudam diversos concretos auto-adensáveis que apresentam uma característica predominante, como o concreto auto-adensável de alta resistência, concreto auto-adensável reforçado com fibras de aço e outros CAAs dosados adequadamente para aplicações específicas.

A partir do surgimento do concreto auto-adensável, muitos congressos, conferências e simpósios foram realizados abordando o tema, em variados lugares do mundo. Pode-se destacar, a título de exemplificação, o Congresso Internacional de Métodos da Produção e Trabalhabilidade do Concreto (BARTOS, MARRS e CLEAND, 1996), o Primeiro Simpósio Internacional de Concreto Auto-Adensável (SKARENDAHL e PETERSSON, 1999), o Segundo Simpósio Internacional de Concreto Auto-Adensável (OZAWA e OUCHI, 2001), (OKAMURA, OUCHI, 2003), o Terceiro Simpósio Internacional de Concreto Auto-Adensável (WALLEVIK e NIELSON, 2003) e o Quarto Simpósio Internacional de Concreto Auto-Adensável, que se realizou recentemente em novembro de 2005, em Chicago, EUA, juntamente com a Segunda Conferência Norte Americana de Dosagem e Uso do CAA. Todos estes simpósios foram assessorados pela RILEM (Réunion Internationale des Laboratoires d'Essais et de Recherches sur les Matériaux et les Constructions), apresentando os principais avanços na área de concreto auto-adensável.

São inúmeros os artigos publicados, livros, manuais de qualidade, comitês, documentos abordando o concreto auto-adensável. Diretrizes européias foram criadas para o concreto auto-adensável, como a “*European Guidelines for SCC - 2005*”, representando o documento do estado da arte do CAA, que contém os itens: especificações, produção, uso e materiais desenvolvidos para pela “*European Federation of Producers and Contractors of Specialist Products for Structures – EFNARC*”. Fundada em 1989, hoje representa o interesse de mais de 350 companhias de toda a Europa em diversos campos da construção civil, dentre eles, o do concreto auto-adensável.

A *European Federation of Concrete Admixtures Associations* (EFCA, 2005), entidade fundada em 1984, e que atualmente representa 10 países da Europa, elaborou algumas diretrizes abordando os requisitos para os materiais constituintes e ensaios aplicados para a produção do CAA, denominado “*SELF-COMPACTING CONCRETE - EFCA - Guidelines on Requirements for Constituent Materials*”, com o intuito de complementar com informações adicionais relevantes o documento da EFNARC o “*European Guidelines for SCC*”.

O interesse do setor da construção pelo concreto auto-adensável vem crescendo de forma significativa nos últimos anos. Este fato conduziu à formação de grupos de trabalho

como, entre outros, os da Sociedade de Engenheiros Civis do Japão (JSCE), o Instituto de Arquitetos do Japão (AIJ), a Associação Técnica Internacional RILEM, a Associação Francesa AFGC, a Federação Européia de Fabricantes de Produtos Especiais para Estruturas EFNARC, e o Instituto do Concreto Pré-fabricado PCI para a redação da documentação de referência, recomendações e normativas (TOMOSAWA et al., 1999; UOMOTO e OZAWA, 1999; SKARENDAHL e PETERSSON, 2000; EFNARC, 2002; PCI, 2003 apud GETTU e AGULLÓ, 2003).

2.3 Vantagens

Uma série de vantagens importantes associadas ao uso do concreto auto-adensável, durante os 15 anos após seu advento, seguem abaixo (OKAMURA et al., 2000, apud GETTU, AGULLÓ, 2003, OUCHI, et al., 2003):

- Menor dependência da formação e experiência dos operários para obter estruturas duráveis;
- Podem-se evitar problemas ocasionados por um adensamento inadequado provocado pela falta de comunicação entre os projetistas e os engenheiros da obra;
- Pode-se reduzir consideravelmente o prazo de execução da construção, especialmente em estruturas monolíticas;
- Facilita o projeto de elementos mais complexos que seriam difíceis ou pouco viáveis de construir mediante uma vibração convencional;
- Reduz o ruído devido à eliminação da vibração, especialmente em indústrias de pré-fabricados e obras no entorno urbano;
- Beneficia o ambiente de trabalho e a saúde dos trabalhadores, em função da eliminação do ruído e das vibrações transmitidas aos operários pelo uso do vibrador, as quais podem provocar dor, fadiga e uma má circulação sanguínea nas mãos;
- Para o setor dos pré-fabricados existem vantagens adicionais como o aumento da vida útil dos moldes, o reemprego mais rápido dos moldes e a redução do tempo e esforço necessários para o acabamento manual dos elementos devido o melhoramento na qualidade das superfícies;
- Em termos econômicos, apesar de o concreto auto-adensável ter um custo por metro cúbico maior que o concreto convencional, o uso daquele pode ser rentável quando se considera o custo total da construção ou a fabricação de um elemento, incluindo a

amortização do misturador, caminhão e moldes, os custos dos equipamentos de vibração e sua manutenção, e a mão-de-obra.

Dentre as vantagens mencionadas acima, Repette (2005) salienta ainda que:

- Para a produção do CAA são utilizadas as mesmas instalações das centrais dos concretos convencionais e os mesmos materiais empregados: aglomerante, aditivo, adições e agregados, e as adaptações no processo de produção são facilmente absorvidas e de baixo custo;
- Com relação ao desgaste do caminhão betoneira, o atrito gerado, entre o CAA e as paredes e pás do balão, verifica-se ser muito menor que para o concreto convencional, prolongando a vida útil destes equipamentos e diminuindo o custo de manutenção dos mesmos;
- No bombeamento do CAA, a alta fluidez e o baixo atrito interno dos agregados contribuem para o menor desgaste do conjunto bomba/duto para o transporte do CAA do que para o concreto convencional;
- Quanto à montagem das fôrmas, estas não necessitam de alterações para o recebimento do CAA, tendo em vista o dimensionamento das mesmas para o recebimento de concreto convencional. De acordo com pesquisa coordenada pela UFSC, concluiu-se que para obras convencionais de edifícios residenciais, as fôrmas para a concretagem de lajes e vigas (até 60 cm de altura) não precisam ser modificadas;
- Para aplicação em obras convencionais, em comparação com o concreto convencional o CAA é muito mais fácil de ser aplicado; as fôrmas tendem a se soltar mais facilmente, com menor dano a elas e ao concreto; pode ser lançado de até 5 m de altura em queda livre e sua movimentação na horizontal pode chegar a 7 m sem que haja segregação e ocorrência de falhas no concreto; o acabamento final a ser dado na superfície do concreto é mais fácil e requer menos trabalho.

2.4 Desvantagens

- As fôrmas devem possuir estanqueidade suficiente para que não haja perda de concreto por quaisquer eventuais orifícios potenciais;
- Com relação à rastreabilidade do concreto auto-adensável, ainda não se tem uma ampla abordagem sobre este assunto na literatura, porém se acredita que o CAA quando empregado na concretagem de várias peças estruturais simultaneamente e sem

uma logística adequada de concretagem pode implicar numa desvantagem no que se refere ao rastreamento do CAA aplicado. Fato este, advindo de sua natureza de auto-preenchimento e movimentos próprios que promovem o seu espalhamento em várias direções e distâncias expressivas, podendo atingir diversas peças estruturais de modo parcial, o que pode dificultar o mapeamento do concreto empregado, no seu estado endurecido.

- A retração e fissuração podem ocorrer em decorrência do elevado teor de aglomerante presente na quantidade de finos do traço correspondente, pois a relação do proporcionamento de aglomerante é diretamente proporcional à quantidade de calor liberado, o que promove o surgimento de maiores tensões no concreto e a conseqüente geração de fissuras. Este efeito pode ser atenuado com maior emprego de materiais inertes.
- Sua obtenção está relacionada diretamente com um controle tecnológico condicionado e minucioso;
- Tendo em vista que o CAA é mais fluido que o concreto convencional, maiores cuidados devem ser despendidos no momento de seu transporte, com o intuito de evitar que ocorram vazamentos.

2.5 Aplicação

Desde o seu surgimento existem referências de aplicações do CAA em obras pioneiras de grande e pequeno porte. A maior parte delas está no Japão, a algumas outras na Europa. Como por exemplo (GETTU e AGULLÓ, 2003):

- Blocos de ancoragem da ponte Akashi Kaikyo, com 1.991 m, 290.000 m³ de CAA, com uma taxa de 1.900 m³/dia, o que diminui o prazo de execução em torno de 6 meses (OKAMURA, 1997; BARTOS e GRAUERS, 1999; OUCHI, 1999; SKARENDAHL e PETERSSON, 2000);
- Outra aplicação significativa foi a construção de um depósito de gás liquidificado da empresa Okasa Gás, com rendimento de 200-250 m³/hora, reduzindo o tempo de execução de 22 para 18 meses e também o número de trabalhadores de 150 para 50 (OKAMURA, 1997; NISHIZAKI et al., 1999; OUCHI, 1999). Esta construção impulsionou a construção de outros depósitos, um deles subterrâneo (SETO et al., 1997; OUCHI, 2001) e também foram construídos um viaduto de concreto protendido (Skarendahl e Petersson, 2000) e um túnel, ambos em Yokohama (TAKEUCHI et al., 1994);

- No campo da edificação, o emprego do CAA tem levado ao desenvolvimento, também no Japão, da tecnologia CFT (*Concrete Filled Tubes*) para a construção de edifícios de grande altura. Esta tecnologia se fundamenta na utilização de tubos de aço preenchidos com CAA e unidos por diafragmas, eliminando a necessidade de fôrma e armadura, e conseqüentemente, diminui o prazo de execução. O CFT tem sido aplicado em pilares de vários edifícios, incluindo os 9 primeiros andares do edifício mais alto do Japão, o Landmark Tower, com 296 m e 80 andares em Yokahama (HAYAKAWA et al., 1993; BILLBERG, 1999);
- Na Suécia foram construídos, até o ano de 1999, 3 pontes e vários edifícios com CAA. Também foi empregado CAA em elementos com armadura convencional e em várias estruturas com CAA reforçado com fibras de aço, incluindo lajes e muros de edifícios, nos quais as fibras substituem totalmente as barras de armadura (GROTH e NEMEGEER, 1999);
- Na França, entre os anos de 1997 e 2000, foram aplicados pelo menos 50.000 m³ de CAA em 40 projetos de edificação e obras civis;
- Na área de reparos existem antecedentes da aplicação destes concretos, com zonas densamente armadas e dificuldade de acesso às mesmas (MCLEISH, 1993; LACOMBE et al., 1997). Para exemplificar, pode-se citar o reparo das pontes na Suíça (CAMPION e JOST, 2000) e no Reino Unido (MCLEISH, 1996);
- A primeira aplicação de CAA na construção de uma obra na Espanha pode ser considerada o arco misto da ponte da Ronda da Hispanidad sobre o rio Ebro em Zaragoza (PUERTA, 2002, 2003), onde se empregou, em 5 horas, 300 m³ de CAA. Também foram aplicados 300 m³ nos muros internos e perimetrais densamente armados de um edifício do Ayuntamiento de Mollet del Vallés (Barcelona), na recuperação de residências em Madri, construção de lajes em Zaragoza e na indústria de pré-fabricação (BORRALLERAS, 2003).

No Brasil, já existem várias localidades estudando e empregando o CAA, embora de forma lenta, mas contínua. Destacam-se os trabalhos desenvolvidos pelas: Universidade Federal de Santa Catarina abordando dosagem e aplicação; Universidade Federal do Rio Grande do Sul, sobre dosagem e uso em indústria de pré-moldados; e Universidades Federais de Alagoas e de Pernambuco, utilizando resíduos na produção de CAA, entre eles o pó de mármore. Também o campo da reologia está sendo estudado pelo Laboratório Central de Furnas e a Universidade Estadual Paulista (UNESP) de Ilha Solteira (REPETTE, 2005).

Em Florianópolis desenvolveu-se o projeto de aplicação do CAA, da Comunidade da Construção coordenado pela UFSC, onde se avaliou o uso do CAA em um volume expressivo para a execução de edifícios residenciais. Contemplou-se o estudo das adaptações necessárias à implantação do CAA e os impactos técnico-econômicos no processo de confecção da estrutura. Os resultados mostraram-se bastante satisfatórios, pois os benefícios técnicos foram evidenciados mediante aplicação do CAA e as adaptações no processo produtivo foram absorvidas com facilidade e baixo custo.

Dentre as aplicações do CAA, pode-se citar o seu emprego em várias construções como: pontes; túneis; tanques; barragens; viadutos; edifícios; edificações correntes; pré-fabricados; CAA na forma de concreto massa; CAA na forma de alta resistência; CAA na forma de concreto leve; CAA reforçado com fibras de aço (utilizado em elementos de fundação, lajes e muros); CAA branco; em estruturas diversas; regiões de elevado risco sísmico; utilização do CAA em áreas de acesso restrito e de seções congestionadas e outras.

2.6 Estado Fresco

As características no estado fresco do CAA governam todas as propriedades fundamentais desse concreto, as quais lhe conferem a auto-compactibilidade. Para melhor entendimento desse concreto, serão abordados na seqüência, o comportamento reológico do CAA e suas propriedades fundamentais.

2.6.1 Comportamento reológico

O concreto auto-adensável pode ser considerado como uma suspensão concentrada onde os sólidos estão dispersos na fase líquida da água, segundo Larrad e Ferraris et al. Outros como Nielsen e Geiker et al., consideram o CAA como um sistema de duas fases que consiste de uma argamassa de comportamento Binghamniano, onde os agregados graúdos estão dispersos na mesma (WÜSTHOLZ, 2005).

Para o estudo do comportamento reológico, o concreto fresco pode ser entendido como uma concentração de partículas com elevado grau de variedade dimensional em suspensão num meio líquido, exibindo um comportamento semelhante ao de um fluido (PEREIRA, BARROS e CAMÕES, 2004). Atendendo a este pressuposto, avaliar o comportamento reológico do concreto fresco não parece ser uma tarefa fácil devido à complexidade da sua composição que incorpora um número elevado de diferentes materiais, com propriedades físicas e mecânicas distintas (vários tipos de agregados, cimento, aditivos e

adições) e que interagem entre si. Infelizmente, não é ainda possível prever o comportamento reológico dos concretos a partir do conhecimento das propriedades dos seus constituintes (PEREIRA, BARROS e CAMÕES, 2004). A variedade e a quantidade de ensaios que seriam necessários para avaliar o efeito de todas as interações entre os constituintes da mistura seria imenso e, conseqüentemente, impraticável (PEREIRA, BARROS e CAMÕES, 2004). Por esta razão, estudam-se as propriedades e o comportamento da mistura, para se conseguir entender o CAA com mais clareza e maior exatidão.

Durante a colocação e consolidação, o comportamento do concreto fresco é influenciado basicamente pelas suas características reológicas (NUNES, 2001). Esse comportamento reológico é descrito pela tensão de escoamento (τ_0) - que é a tensão mínima necessária para que o concreto entre em movimento, ou seja, inicie seu escoamento, estando diretamente ligada à resistência que os agregados exercem ao escoamento da mistura e viscosidade plástica (η) - expressa a resistência do concreto em continuar escoando. Definidas geralmente de acordo com o modelo simplificado de Bingham mostrado na Figura 1 e expresso pela equação 1:

$$\tau = \tau_0 + \eta \cdot \dot{\gamma} \quad (1)$$

Onde:

τ - é a tensão de cisalhamento;

$\dot{\gamma}$ - é a taxa de cisalhamento.

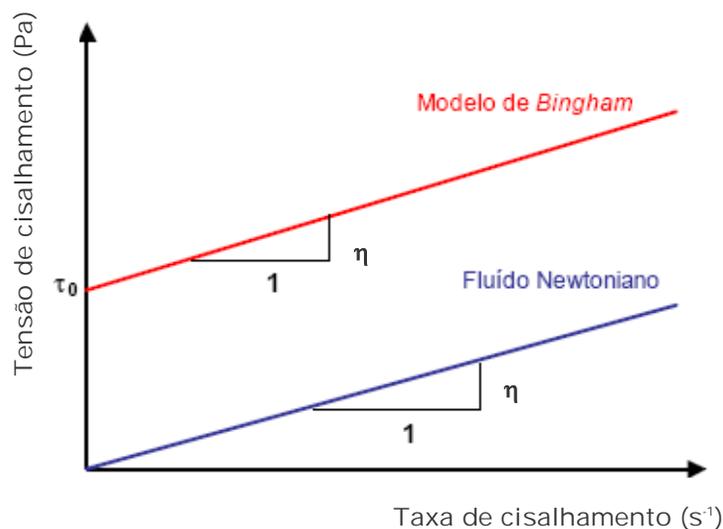


Figura 1 - Representação de um fluido com comportamento binghamiano e outro newtoniano.

Estes parâmetros do concreto no estado fresco são itens essenciais para a deformabilidade do CAA, devendo apresentar tensão de escoamento mínima bem mais baixa que a do concreto convencional e a viscosidade plástica, por sua vez, mais elevada, ou seja, a viscosidade deve ser moderada para que haja a estabilidade da mistura.

Segundo este modelo, inicialmente, é necessário aplicar uma dada tensão de cisalhamento para se iniciar o movimento (τ_0 - tensão de escoamento, em Pa), seguido pelo aumento da tensão de cisalhamento. A inclinação da reta corresponde à viscosidade plástica (η em Pa.s), como mostra a Figura 1 (NUNES, 2001).

Valores de referência para a tensão de escoamento e a viscosidade plástica, para um CAA com desempenho adequado, são apresentados na Figura 2, segundo Wallevik, 2003, onde a tensão de escoamento não deve ser maior que 70 Pa e a viscosidade plástica do CAA deve estar entre 10 e 120 Pa.s (REPETTE, 2005).

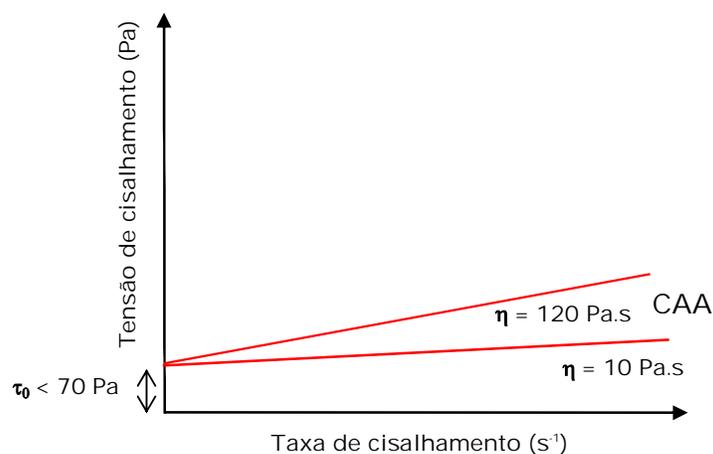


Figura 2 - Faixas referenciais de valores de tensão de escoamento e viscosidade plástica para o CAA segundo Wallevik, 2003.

O fluido newtoniano apresenta tensão de escoamento nula, conforme visto na Figura 2, a qual seria a ideal para o CAA, porém ela sempre irá existir por menos expressiva que seja, pois existe um atrito mínimo entre as partículas na mistura de concreto.

Para que o concreto auto-adensável flua, o seu peso deve ser maior que sua tensão de escoamento caso contrário, o CAA não irá se movimentar.

Os principais mecanismos que influenciam a reologia são o atrito interno das partículas e a quantidade de água livre, que são dependentes da tensão superficial e da dispersão das partículas. Estas, por sua vez, podem ser modificadas utilizando superplastificantes apropriados e conseguindo um empacotamento adequado das partículas finas (incluindo o cimento). Pode utilizar-se ainda um agente de viscosidade responsável por

modificar principalmente a viscosidade plástica (SKARENDHAL e PETERSSON, 2001, apud NUNES, 2001).

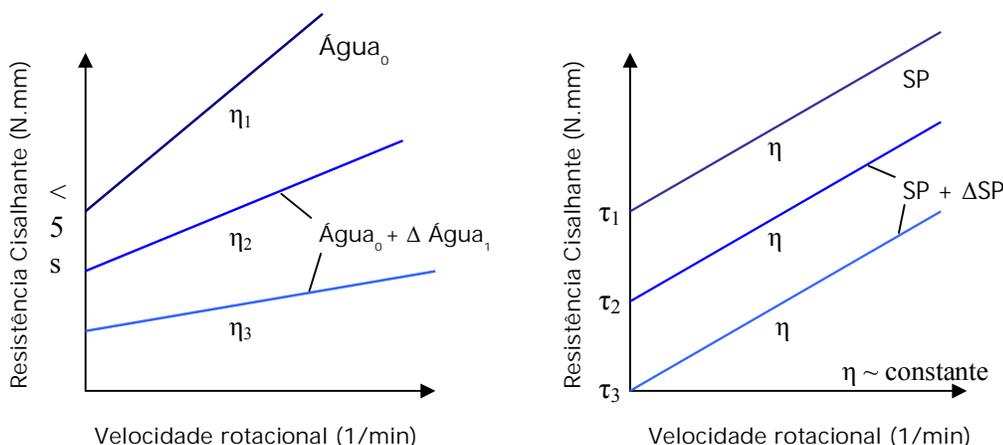


Figura 3 - Influência da quantidade de água e do teor de superplastificante nas propriedades da suspensão da pasta (KORDTS e DÜSSELDORF , 2003).

Conforme Kordts e Düsseldorf (2003), as propriedades reológicas da suspensão dos finos, constituída por cimento, adições, água e aditivo, são determinadas pela relação água/finos e a o teor de superplastificante. A influência da quantidade de água e do teor de aditivo superplastificante nas propriedades da pasta de cimento e cinza volante é mostrada na Figura 3. Esse comportamento reológico da suspensão de cimento e finos corresponde ao modelo Binghamniano, onde são expressos os parâmetros reológicos como a tensão de escoamento (τ_0) e a viscosidade (η). Dessa forma, verifica-se que estes parâmetros são afetados pelo conteúdo de água e pelo teor de superplastificante por diferentes caminhos. Aumentando-se a quantidade de superplastificante a tensão de escoamento diminui, enquanto que um aumento na quantidade de água reduz ambos os parâmetros.

Os efeitos dos materiais do concreto sobre a tensão de escoamento e viscosidade plástica são mostrados na Figura 4, de forma qualitativa, com a influência dos componentes que constituem CAA (CORRADI, 2003).

Desse modo, o efeito de cada componente é dado:

- As variações no teor de finos afetam principalmente a τ_0 e um pouco da viscosidade;
- O teor de ar afeta principalmente a viscosidade plástica;
- A água afeta a τ_0 e a viscosidade;
- A dosagem de superplastificante afeta principalmente a τ_0 e muito sutilmente a viscosidade;
- O APV afeta principalmente a viscosidade plástica.

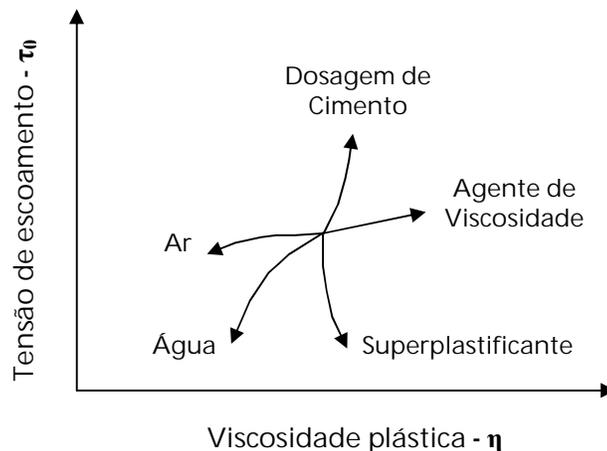


Figura 4 - Efeito dos materiais do concreto sobre a tensão de escoamento e a viscosidade plástica (CORRADI, 2003).

Os ensaios realizados com relação à determinação dos aspectos reológicos do concreto são obtidos por meio de reômetros. Segundo Pileggi e Pandolfelli (2003), os reômetros mais recomendados para a aplicação em concreto são os chamados reômetros de cisalhamento, nos quais se aplica um cisalhamento controlado sobre o fluido determinando-se o torque (força) necessário para tal.

Segundo Repette (2005) a utilização de reômetros é ainda limitada, seja pela escassez nos centros de pesquisa, seja pela falta de um aparelho padrão aceito e usado pelos pesquisadores. Por isso, o emprego da reometria é restrito para o desenvolvimento do CAA, pois há limitações quando se deseja comparar resultados provenientes de equipamentos diferentes.

2.6.1.1 Fatores que afetam a reologia do concreto

Os principais fatores que influenciam os parâmetros reológicos do concreto são o proporcionamento do concreto, incluindo dosagem e tipo de aditivos químicos e minerais, graduação, forma e tipo do agregado, quantidade de água e característica do cimento. A mesma dosagem da mistura pode resultar em diferentes propriedades de fluidez se os fatores secundários não são levados em conta. São eles:

- Tipo de misturador: os quais podem induzir a vários níveis de defloculação e incorporação de ar;
- Seqüência de mistura, por exemplo, seqüência de introdução dos materiais dentro do misturador;
- Duração da mistura;
- Temperatura.

A determinação das características reológicas é necessária para especificação da aplicação, seguido dos itens necessário para serem considerados:

- Método de entrega do concreto até a forma, por exemplo, bombeado, com baldes;
- Método de adensamento, por exemplo, vibração, adensamento manual, nenhum adensamento;
- Tipo do método de acabamento.

Em consideração com a aplicação, alguns desses itens serão automaticamente selecionados. Por exemplo, uma estrutura com uma quantidade muito alta de armadura é construída, o concreto precisa ser auto-adensável porque será impossível o vibrador alcançar todo o concreto.

Outra variável que deverá ser destinada (dirigida) é a dependência do tempo nos parâmetros reológicos. Este fenômeno é freqüentemente descrito com a perda de slump ou retardo excessivo. Estes fenômenos podem ocasionar imprevistos que influenciam operacionalmente no desenvolvimento da obra, tais como dificuldade em lançar o concreto pela perda de fluidez com o passar do tempo, atraso na liberação do tráfego para o início dos trabalhos de um pavimento subsequente quando do retardo no desenvolvimento da resistência, e em casos onde o retardo é mais prolongado em que a desmoldagem teria que ser postergada.

2.6.1.2 Distanciamento mínimo entre as partículas de agregados

A pasta de cimento não serve somente para recobrir a superfície dos agregados, mas também para diminuir o atrito entre os agregados (NOGUCHI e TOMOSAWA, 1999).

Quando se adiciona pasta de cimento muda a interação entre os agregados. Isto é caracterizado como um efeito de dispersão, onde os agregados são empurrados para longe um do outro, como mostra a Figura 5.

Sem um filme de pasta de cimento ao redor deles, o movimento entre os agregados gera muito atrito e seria impossível, neste caso, de se ter trabalhabilidade (NOGUCHI e TOMOSAWA, 1999).

Desse modo, observa-se que o concreto necessita de uma quantidade de pasta mínima que garanta o distanciamento mínimo entre as partículas de agregados, para evitar que a fluidez do concreto ou argamassa não seja comprometida pelo atrito existente entre os grãos.

Para a obtenção de um CAA mais econômico, com custos mais baixos de composição e que atenda resistências usuais, é necessário que seja realizado um estudo investigativo do concreto auto-adensável, reportando-se às fases que o compõem. E assim contemplar aspectos constitutivos e funcionais.

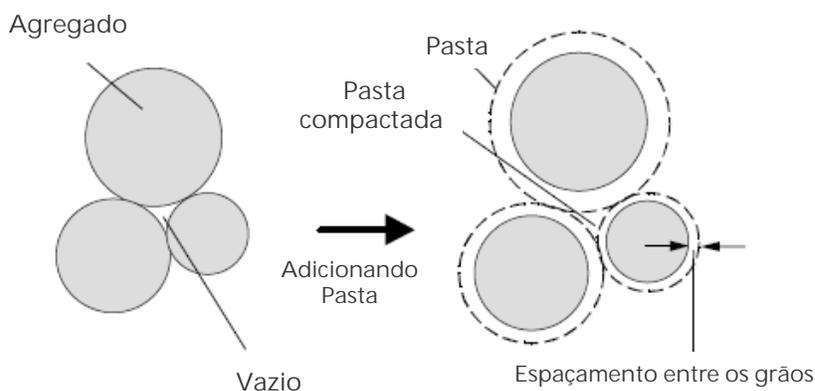


Figura 5 - Quantidade de pasta necessária para promover a dispersão dos agregados.

Nesta fase de análise, torna-se conveniente focar as sub-fases constituintes do concreto auto-adensável como pasta, argamassa e agregado, para um maior entendimento de seu comportamento reológico.

Na fase de pasta, é importante que o aditivo superplastificante atue com precisão para assegurar que as partículas de cimento fiquem todas dispersas por repulsão eletrostática e defloculadas, para que a água da mistura se torne mais efetiva.

Existe um volume de pasta mínimo para envolver os agregados que impede a ocorrência de colisões diretas entre eles, e que seja eficaz na lubrificação dessas partículas a fim de promover no CAA a manutenção da alta fluidez e a viscosidade moderada. O agregado da mistura deve contribuir com uma distribuição granulométrica bem definida e formas mais arredondadas para promover um maior deslizamento quando imersos na pasta, e assim garantir conjuntamente com aditivo superplastificante a baixa tensão de escoamento com espalhamento adequado.

Já a argamassa que envolve os grãos de agregado graúdo, esta por sua vez, deve ser fluida para poder lubrificar as partículas de agregado graúdo, promovendo o rolamento entre elas, e possuir viscosidade moderada capaz de sustentar estas partículas mais pesadas de agregado graúdo.

Nestes termos, para a garantia da fluidez do CAA e estabilidade, necessita-se que a pasta tenha coesão suficiente para sustentar os grãos de agregado miúdo, e este conjunto garantir a sustentação das partículas maiores de agregado graúdo. Para tanto, acredita-se que a forma dos grãos esteja mais atrelada ao cumprimento da fluidez, pois grãos mais arredondados promoverão um efeito de rolamento maior, com menor atrito entre eles. Já uma boa distribuição granulométrica, contínua e com grãos bem distribuídos, incorre na

estabilidade da mistura, aumentando a compacidade da mesma e conseqüentemente sua coesão.

Da mesma maneira, existe um conteúdo de argamassa mínima para envolver as partículas de agregado graúdo afastando-os um dos outros e os sustentando para manter a estabilidade do concreto e evitar a segregação.

2.6.2 Propriedades Fundamentais

A auto-compactabilidade do CAA no estado fresco pode ser caracterizada essencialmente pelos seguintes três requisitos funcionais: capacidade de preenchimento, resistência à ocorrência de segregação e capacidade de passar entre espaços estreitos (OKAMURA e OUCHI, 1999). Estes requisitos constituem as três propriedades principais do CAA, as quais são descritas a seguir.

2.6.2.1 Capacidade de preenchimento

É a capacidade de preencher a fôrma completamente sob ação do seu peso próprio.

Nunes (2001) explica que para se ter uma capacidade de preenchimento adequada deve existir equilíbrio entre a capacidade e a velocidade de deformação, que passa por reduzir o atrito inter-partículas e obter uma pasta com elevada deformabilidade. Para reduzir o atrito dos agregados é necessário reduzir o número de contatos inter-partículas, por redução do conteúdo de agregados, resultando no aumento do conteúdo de pasta. A pasta deve exibir elevada deformabilidade e isto passa pela dispersão das partículas dos finos, o que foi possibilitado por uma nova geração de superplastificantes com elevado poder de dispersão. É importante assegurar elevada fluidez (valor baixo da tensão de escoamento) e, simultaneamente, elevada resistência à segregação (viscosidade moderada). Diferentemente da água, que reduz a tensão de escoamento e a viscosidade, a introdução de um superplastificante reduz essencialmente a tensão de escoamento (aumenta a fluidez) e causa uma diminuição limitada da viscosidade. Assim, pode obter-se um concreto com elevada fluidez sem afetar significativamente a sua coesão.

2.6.2.2 Capacidade de passar por espaços estreitos

A existência de obstáculos provoca uma alteração de percurso das partículas dos agregados e provoca contatos instantâneos entre elas. Devido a estes contatos existe a possibilidade de se formar um arco estável, que bloqueia o resto do escoamento do concreto. A formação deste arco é facilitada com agregados de maior dimensão e quando o conteúdo de agregados é elevado (NUNES, 2001). A Figura 6 exemplifica esse mecanismo de bloqueio.

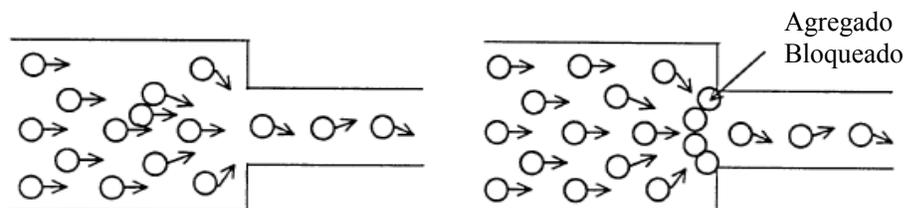


Figura 6- Mecanismo de bloqueio na passagem da seção reduzida (TAKATA e TANGTERMSIRIKUL, 2000, apud WÜSTHOLZ, 2003).

2.6.2.3 Resistência à segregação

A segregação do concreto fresco pode ser definida como a separação dos constituintes de uma mistura heterogênea, deixando a mistura sem uniformidade, e pela falta de homogeneidade na distribuição dos seus materiais constituintes. No concreto, as diferenças de tamanho das partículas e das massas específicas são causas primárias de segregação (NEVILLE, 1997).

A maior viscosidade da pasta de cimento se opõe ao movimento descendente das partículas mais pesadas de agregado. Desse modo, misturas com relação água/cimento menor são menos propensas à segregação (NEVILLE, 1997).

Para evitar a exsudação (segregação entre sólidos e água), é essencial reduzir a quantidade de água livre na composição. Isto se consegue reduzindo o conteúdo em água e a razão água/finos. É possível, também, utilizar materiais finos com elevada superfície específica, aumentando assim a quantidade de água adsorvida à superfície das partículas dos finos. Da mesma forma a resistência à segregação, entre a água e os sólidos, pode ser melhorada pela introdução de um agente de viscosidade. Dentre os diferentes tipos de segregação, no que diz respeito ao enchimento de volumes densamente armados, a segregação dos agregados graúdos parece assumir um fator determinante para se obter uma auto-compactabilidade adequada (NUNES, 2001).

A EFNARC (2002) dispõe de uma lista de recomendações para solucionar possíveis causas de não conformidade dos requisitos especificados para o CAA, evidenciando-se os efeitos refletidos nas suas propriedades fundamentais de auto-compactibilidade, como as capacidades de preenchimento e de passagem e a resistência à segregação.

Desse modo, pode-se identificar a melhor medida possível para solucionar um eventual problema que venha a ocorrer. Toda ação pode ter efeitos positivos e negativos sobre as distintas características do concreto. A Tabela 1 fornece uma relação de possíveis ações corretivas frente às falhas identificadas na produção do CAA.

Tabela 1 - Possíveis medidas de correção a partir da identificação de falhas (EFNARC, 2002).

Possível ação	Efeitos		
	Capacidade de Preenchimento	Capacidade de Passagem	Resistência à segregação
Viscosidade demasiadamente alta			
Aumento do teor de água	M	M	P
Aumento do volume de pasta	M	M	M
Aumento do superplastificante	M	M	P
Viscosidade demasiadamente baixa			
Redução do teor de pasta	P	P	M
Redução do volume de pasta	P	P	P
Redução do superplastificante	P	P	M
Aumento de aditivo promotor de viscosidade	P	P	M
Uso de pó mais fino	M	M	M
Uso de areia mais fina	M	M	M
Tensão de escoamento demasiadamente alta			
Aumento do teor de água	M	M	P
Aumento do volume de pasta	M	M	M
Aumento do superplastificante	M	M	M
Segregação			
Aumento do volume de pasta	M	M	M
Aumento do volume de argamassa	M	M	M
Redução do teor de água	P	P	M
Uso de pó mais fino	M	M	M
Perda rápida de trabalhabilidade			
Uso de um tipo de cimento reativo mais lento	N	N	P
Aumento do retardador	N	N	P
Uso de superplastificante diferente	?	?	?
Substituir cimento por adição	?	?	?
Bloqueio			
Redução do tamanho máximo do agregado	M	M	M
Aumento do volume de pasta	M	M	M
Aumento do volume de argamassa	M	M	M

Legenda:

M – Usualmente melhora o resultado do concreto

N – Usualmente não fornece resultado significativo

P – Usualmente piora o resultado do concreto

? – Efeito não pode ser prognosticado

2.7 Estado Endurecido

No estado endurecido, o CAA é denso, homogêneo e tem as mesmas propriedades estruturais e uma vida útil semelhante a do concreto convencional compactado com vibração. Segundo Repette (2005) existe CAA com resistências à compressão de 20 a 100MPa; tem-se também maior preocupação quanto à retração e fluência, devendo-se ao fato do CAA apresentar, naturalmente, maior teor de pasta e de argamassa que os concretos convencionais. Por outro lado, um teor elevado de pasta nem sempre significa um teor elevado de cimento, pois o emprego de adições de finos é considerável, na maioria dos CAA.

Em relação à durabilidade do CAA, é notoriamente melhorada em comparação ao concreto convencional, visto que, sua maior homogeneidade, sua maior fluidez lhe confere maior retenção de água e promove melhor hidratação do cimento (REPETTE, 2005). Sua capacidade de passagem e resistência ao bloqueio e segregação são vantagens expressivas que evitam a ocorrência de ninhos de concretagem ou falhas no concreto endurecido. A resistência de aderência do CAA à armadura é maior ou igual a do concreto convencional, pois há menor quantidade de água livre na mistura do CAA para se acumular nas interfaces armadura/concreto em decorrência do efeito parede, e há também maior homogeneidade do CAA nesta área da interface (SKARENDAHL, 2003; apud REPETTE, 2005).

2.8 Materiais Constituintes

A maioria dos componentes do concreto auto-adensável são os mesmos utilizados para a fabricação dos concretos convencionais vibrados (GETTU e AGULLÓ, 2003; EFNARC, 2005; EFCA, 2005). Assim, o cimento e os agregados não têm que cumprir requisitos específicos adicionais que exigem os concretos convencionais de boa qualidade. Nesse sentido, existe uma grande vantagem do ponto de vista econômico em utilizar materiais locais, pois se minimizam os custos com transporte.

O aditivo superplastificante é um componente indispensável para o CAA, e também se pode selecionar daqueles disponíveis no mercado. Os únicos componentes atípicos do CAA em relação ao concreto convencional são os finos minerais e agentes promotores de viscosidade, os quais são empregados para se alcançar um nível adequado de coesão da mistura e evitar a segregação e a exsudação durante a colocação do concreto (GETTU e AGULLÓ, 2003).

Para assegurar uma realização uniforme e consistente do CAA deve-se atentar em especial na seleção inicial de materiais, assim como manter um controle rigoroso e contínuo da uniformidade dos distintos lotes de abastecimento, para seguir os critérios de conformidade (EFNARC, 2005).

Tipicamente a mistura de CAA resulta em um concreto que, comparado ao concreto tradicional vibrado (EFCA, 2005), contém:

- Elevado conteúdo de finos ($< 0,125$ mm);
- Aumento do uso de adições;
- Baixo conteúdo de agregado graúdo;
- Baixa relação de água/finos;
- Aumento do uso de aditivos.

Para a produção do CAA, existe a necessidade de empregar uma maior quantidade de finos, que podem ser constituídos por combinação entre cimento e adições, os quais são definidos pela EFNARC 2002, como partículas sólidas com dimensões menores que 0,125 mm, garantindo assim, uma viscosidade moderada ao CAA. Este maior consumo de finos é acompanhado em uma redução na quantidade de agregados empregados, especialmente do agregado graúdo, além de uma diminuição dos diâmetros dos agregados graúdos em relação ao concreto convencional.

Para atender aos requisitos da seleção criteriosa dos materiais para a produção do CAA, faz-se necessário o conhecimento dos materiais potencialmente constituintes, os quais serão apresentados na seqüência.

2.8.1 Cimento

A EFCA cita que todo cimento que cumpre as suas normas estabelecidas pode ser usado para a produção do CAA. A escolha correta de cimento normalmente é ditada pelas exigências específicas de cada aplicação, como acontece com os concretos normais. O cimento será diferenciado através do tipo e também pelo fabricante. Cada cimento interagirá de um modo diferente com os outros materiais constituintes e os aditivos podem ser particularmente sensíveis à química do cimento.

Dependendo de sua composição química, sua finura e sua superfície específica, cada cimento terá uma demanda de água específica que conferirá certa reologia ao concreto fresco. Cimentos que exigem elevado consumo de água tendem a aumentar a viscosidade da pasta, necessitando de maiores adições de água e/ou superplastificantes.

Geralmente se aceita que o conteúdo de finos do CAA deveria ser de pelo menos 500 kg/m^3 , a não ser que sejam usados aditivos para reduzir a segregação. Esta fração de finos não deveria ser composta somente por cimento, pois isto poderia conduzir a níveis altos de fissuras térmicas, retração por secagem e fissuração. O típico cimento empregado no CAA é o cimento portland com até 5 % de adição e estão compreendidos na faixa de 300 a 450 Kg/m^3 .

Para qualquer tipo ou fabricante de cimento utilizado, suas propriedades não devem diferir significativamente entre os lotes, pois o controle de qualidade do CAA deve ser mais rigoroso que o do concreto normal vibrado.

2.8.2 Adições

Como o CAA requer um elevado volume de pasta, o uso de adições de finos é prática comum na fabricação desse concreto. Este material fino melhora a estabilidade do CAA como a resistência à segregação e seu comportamento reológico, mantendo a coesão. Ao mesmo tempo estas adições podem permitir uma redução na quantidade de cimento e então reduzem problemas associados com o calor de hidratação e a retração térmica (EFCA, 2005). Com a redução do consumo de cimento, o CAA pode sofrer um decréscimo de resistência, dependendo do tipo de adição empregada, e se torna mais atraente do ponto de vista econômico, para uma aplicação que não demande resistências elevadas.

As adições são classificadas de acordo com a capacidade reativa destas com o cimento (EFNARC, 2005):

- *Inerte ou semi-inerte*: Fíler mineral, filer de vidro moído (deve ser testado para verificar a reatividade e o risco de reação com os álcalis do cimento) e pigmentos;
- *Pozolânicas*: Pozolana natural, cinza volante e Sílica ativa;
- *Hidráulicas*: Escória de alto forno.

As adições usuais mais disseminadas serão repassadas na seqüência.

2.8.2.1 Fíler mineral

Segundo a definição da EFNARC (2005) a distribuição do tamanho da partícula, a forma e a absorção da água dos finos podem afetar a demanda de água e assim a trabalhabilidade na elaboração do CAA. Os finos do carbonato de cálcio são amplamente usados e podem proporcionar excelentes propriedades reológicas e um bom acabamento final. O ideal é que o tamanho seja menor que 0,125 mm preferivelmente mais que 70 % deve ser menor que 0,075 mm. Finos especialmente moídos para esta aplicação oferecem a vantagem

de melhorar a uniformidade da distribuição do tamanho da partícula nas misturas, dando um maior controle da demanda de água e sendo especialmente adequados para o CAA.

O filer calcário consiste em calcário pulverizado cujo principal componente é a calcita (CaCO_3), podendo apresentar uma superfície específica Blaine de 2.500 a 8.000 cm^2/g (NUNES, 2001). Do ponto de vista químico, é quase inerte e por essa razão é considerado uma adição inerte.

2.8.2.2 Cinza Volante

A cinza volante é um material vítreo constituído de silicato de alumínio, inorgânico, e normalmente é derivado de um subproduto da queima do carvão. É finamente moída, de forma esférica, e tem propriedades pozolânicas.

A reação hidráulica da cinza volante permite uma maior substituição de cimento, enquanto reduz o calor de hidratação e a retração térmica. Também aumenta a coesão na mistura, enquanto reduz qualquer tendência para exsudação e segregação, deixando a mistura mais robusta e menos sensível às mudanças nos teores de água. Porém níveis altos de cinza volante podem produzir uma fração de pasta resistente ao escoamento (EFCA, 2005).

2.8.2.3 Sílica-ativa

A sílica-ativa é um subproduto da produção de silício e é essencialmente composta de dióxido de silício, em partículas muito finas (SiO_2), além de exibir propriedades pozolânicas. Sua grande finura e forma esférica causam um aumento da coesão, melhorando a resistência à segregação, como também aumenta a resistência mecânica e durabilidade do concreto. A sílica ativa é tipicamente utilizada entre 4 a 6 % em massa de cimento, normalmente limitada pelo elevado custo. A sílica-ativa é muito útil para a fabricação do CAA de alta resistência (> 70 MPa) (EFNARC, 2005).

2.8.2.4 Escória granulada de alto forno

A escória granulada de alto forno é um elemento hidráulicamente ativo, bastante fino, com baixo calor de hidratação. Alguns cimentos como os CP II-E e o CP III contém esse material como adição, e em alguns casos, podendo ser colocada à mistura separadamente. Elevadas proporções de escória granulada de alto forno afetam o CAA, com baixos níveis de estabilidade, com problemas de controle da consistência, pode incrementar o risco de segregação (EFNARC, 2005).

2.8.2.5 Outras adições

Outras adições como metacaulim, pozolana natural, pó-de-mármore, cinza da casca do arroz, vidro granulado e outros finos podem ser empregados ou considerados como adições para o CAA, mas deverão ser ensaiados, e verificados seus efeitos a curto e longo prazo no concreto auto-adensável.

2.8.3 Agregados

De acordo com a EFNARC (2005) os agregados empregados na fabricação do CAA devem ser controlados de forma minuciosa, contínua e deve-se saber sua umidade, sua absorção de água, sua curva granulométrica e sua variação de quantidade de finos para produzir um CAA de qualidade constante. Normalmente o uso de agregados lavados dará um produto mais uniforme. Mudar o fornecedor de agregado acarretará em mudanças nas propriedades do CAA, pois será necessária uma reavaliação exaustiva e minuciosa.

A forma e a distribuição do tamanho dos agregados (coeficiente de forma) são muito importantes e afetam a compacidade e o índice de vazios do CAA. Alguns métodos de formulação usam a porosidade dos agregados para determinar os volumes da pasta e argamassa necessários.

2.8.3.1 Agregado graúdo

Quando o volume de agregados graúdos é elevado, a probabilidade de contato direto entre partículas aumenta drasticamente, resultando num aumento da engrenagem entre as partículas, com uma maior intensidade que no caso dos agregados miúdos (NUNES, 2005).

O tamanho máximo do agregado graúdo normalmente não ultrapassa os 20 mm (GETTU e AGULLÓ, 2003; REPETTE, 2005) no CAA, sendo usuais tamanhos máximos compreendidos entre 12 e 16 mm. Esta limitação é imposta para poder obter maior uniformidade de movimento e menor risco de bloqueio no fluxo (GETTU e AGULLÓ, 2003). Embora existam casos de utilização de tamanhos maiores.

Para Repette (2005) o emprego de agregado graúdo com dimensão característica de 10 mm é bastante difundido e pode resultar em uma composição mais econômica e de melhor desempenho em relação ao agregado de maior dimensão. Vale ressaltar que para um diâmetro do agregado, maior deverá ser a viscosidade da pasta e argamassa a fim de evitar a segregação e a possibilidade de ocorrência de bloqueio quando o concreto passa por restrições (REPETTE, 2005).

A granulometria, a forma dos agregados graúdos influencia diretamente a fluidez, a capacidade de passagem do CAA e a demanda de pasta. Quanto mais esféricos forem os agregados graúdos, menores serão os bloqueios e maior a fluidez (EFNARC, 2005).

A EFCA (2005) descreve que a escolha do tamanho do agregado graúdo, forma e teor são de suma importância para o CAA para se ter boa capacidade de passagem ao bloqueio. No concreto convencional é normal maximizar a quantidade de agregado graúdo, no CAA é habitual reduzir a quantidade e classificá-lo segundo o tamanho para minimizar o risco de bloqueio.

A distribuição de tamanho e a forma de agregado graúdo influenciam diretamente as propriedades reológicas do CAA. A forma esférica das partículas do agregado resulta em maior o fluxo, porque a fricção interna é minimizada. A capacidade de fluxo do CAA fica mais difícil com a perda da forma esférica, requerendo quantias maiores de água/superplastificante e volume de pasta. Em casos extremos, com o uso de agregados longos ou lamelares, o atrito interno é tão grande que o CAA não pode fluir livremente e tais agregados não são recomendados para a produção de CAA (EFCA, 2005).

A natureza do tipo agregado normalmente não é uma limitação absoluta, mas deveriam ser considerados os benefícios e desvantagens de cada tipo conforme a EFCA, 2005:

- Agregado Artificial: Possui baixa absorção de água, podendo ser bastante benéfico na produção de CAA;
- Agregados Granítico e de Pedra calcária: Por natureza, estes materiais são absorventes e podem estar empoeirados, aumentando a absorção que pode resultar na redução da trabalhabilidade do CAA. Suas forma e classificação são variáveis de acordo com o fornecedor e origem, mas materiais moídos não são verdadeiramente esféricos;
- Agregado Dolomítico: Estes materiais não são muito absorventes e têm uma baixa demanda de água. Porém, eles são muito densos e este é um problema potencial para o CAA podendo ocorrer sua sedimentação, o que responde pela segregação;
- Agregado Basáltico: Estes materiais têm uma densidade alta que é um desafio à estabilidade do CAA. Eles podem ser usados satisfatoriamente, contanto que a mistura seja dosada com um conteúdo de pasta mais alto e viscosidade.
- Agregado leve: Estes foram prosperamente usados para CAA, mas se nota que o agregado pode migrar à superfície se a viscosidade de pasta for baixa e isto pode não ser descoberto através de testes de segregação.

2.8.3.2 Agregado miúdo

Todas as areias em conformidade com as normas prescritas podem ser empregadas no CAA, devendo ser analisadas e selecionadas para o emprego no CAA.

Segundo a EFNARC (2005) a influência dos agregados finos nas propriedades do CAA fresco é maior que a dos agregados graúdos. As frações das partículas menores que 0,125 mm se incluem no conteúdo de finos da pasta e deverão ser consideradas no cálculo da relação água/finos.

Entretanto, Repette (2005) considera como finos a fração dos materiais com partículas menores que 0,075 mm, recomendação a ser adotada neste estudo.

Um alto teor de pasta nas misturas do CAA ajuda a reduzir as fricções internas entre as partículas de areia, visto que é muito importante a boa distribuição do tamanho das partículas.

No caso do CAA, devido ao volume alto de pasta, a fricção interna entre as partículas de areia deveria ser mínima, e é preferível usar areias arredondadas para minimizar o volume dos espaços entre partículas (EFCA, 2005).

Em todos os casos, é essencial saber o teor de umidade e absorção de água precisamente, para ajustar a quantia de água do CAA.

2.8.4 Aditivos

Um componente essencial do CAA são os aditivos superplastificantes ou redutores de água de alta eficiência. Os aditivos promotores de viscosidade são usados para ajudar a reduzir a segregação, a exsudação e a sensibilidade da variação dos outros constituintes da mistura, especialmente para o teor de umidade (EFNARC, 2005).

2.8.4.1 Superplastificante

Diferentes tipos de superplastificantes baseados nos naftalenos e melaminas modificados, e os copolímeros de nova geração têm sido empregados na produção do CAA (SKARENDAHL e PETERSSON, 2000; HAMADA et al., 2000; DOMÍNGUEZ, 2003, apud COLLEPARDI, M., 2001).

Os aditivos a base de ácidos sulfônicos de naftaleno formaldeído e melamina formaldeído promovem a dispersão dos grãos de cimento por meio de repulsão eletrostática, e também causam a diminuição da tensão superficial do meio aquoso do concreto, aumentando, assim, a segregação devido à diminuição da viscosidade da pasta (REPETTE, 2005).

O mecanismo de atuação desse grupo sulfônico, bem como a representação esquemática do formato de sua cadeia principal é mostrado na Figura 7.

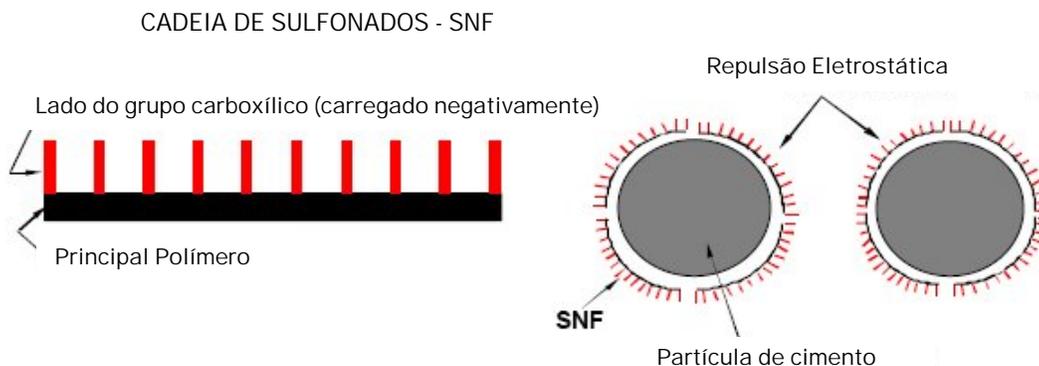


Figura 7 - Representação esquemática do polímero sulfonado (SNF) e o do seu mecanismo de atuação nas partículas de cimento (COLLEPARDI, 2003).

Tendo como base esse modo de atuação, os grãos de cimento afastam-se simplesmente pela repulsão das cargas elétricas, o que resulta num menor distanciamento entre partículas, conforme pode ser observada na Figura 8. Isso se reflete diretamente na eficiência do aditivo na mistura do CAA, pois os grãos, estando mais próximos um dos outros, terão maiores possibilidades de se chocarem e diminuir a fluidez da pasta.

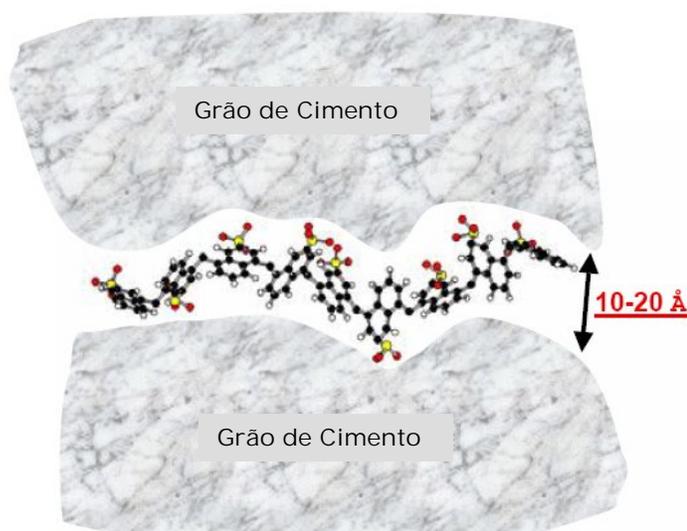


Figura 8 - Distância entre os grãos de cimento promovida pela atuação do aditivo a base de polímeros sulfonados (Manual técnico - Sika).

Os copolímeros em geral, e os policarboxilatos em particular parecem ser os mais adequados para o CAA, devido a sua maior eficiência. Quimicamente, os policarboxilatos baseiam-se em copolímeros de ácido acrílico e grupos éter de ácido acrílico, criam uma capa de adsorção de grande volume ao redor das partículas de cimento devido às suas largas cadeias laterais que impedem a floculação e facilitam a alta fluidez da pasta de cimento. A Figura 9 ilustra o mecanismo de ação dos copolímeros de policarboxilato e a sua representação esquemática.

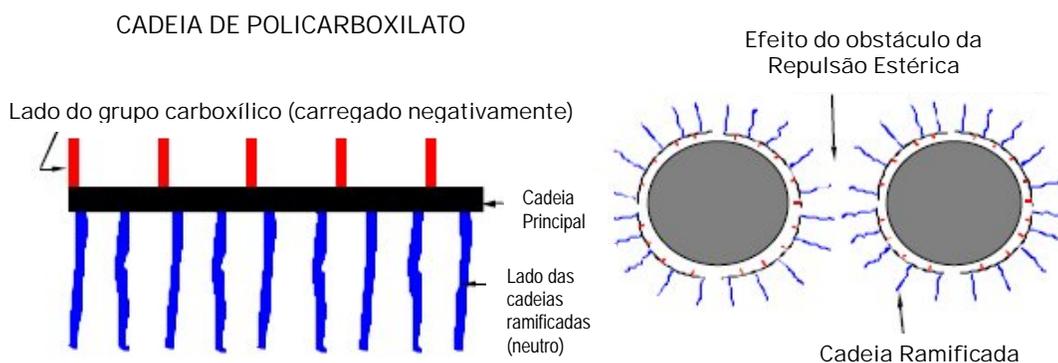


Figura 9 - Representação esquemática do policarboxilato e de seu mecanismo de atuação nas partículas de cimento (COLLEPARDI, 2003).

Nesse sentido, o modo de atuação desse aditivo demonstra ser mais eficiente, pois de um lado de sua cadeia polimérica principal existem cargas negativas que serão atraídas pelas cargas da superfície dos grãos de cimento, e conseqüentemente ocorrerá sua adsorção à superfície do grão de cimento. Já do outro lado da cadeia, existem longas cadeias poliméricas ramificadas que provocam a dispersão dos grãos por repulsão estérica, ou seja, formação de uma barreira física entre as partículas de cimento, a qual promove maior afastamento entre os grãos, como pode ser visto na Figura 10. Assim, a dispersão dos grãos ocorre sem causar a diminuição expressiva da viscosidade da pasta, o que é desejável para a resistência à segregação da mistura (REPETTE, 2005).

Repette (2005) estabelece que mesmo para os aditivos de base policarboxilatos, podem ocorrer perdas de fluidez que comprometam a aplicação do CAA, sendo que a queda do seu desempenho ocorre mais comumente nos primeiros 30 minutos após a mistura. Neste caso, deve-se buscar a compatibilização do aditivo com os finos e avaliar os efeitos das formas de mistura na manutenção da fluidez do CAA.

O melhor desempenho dos aditivos, tanto no aspecto técnico como econômico é conseguido quando empregado para aperfeiçoar misturas bem proporcionadas, e não para corrigir deficiências na dosagem do CAA (REPETTE, 2005).

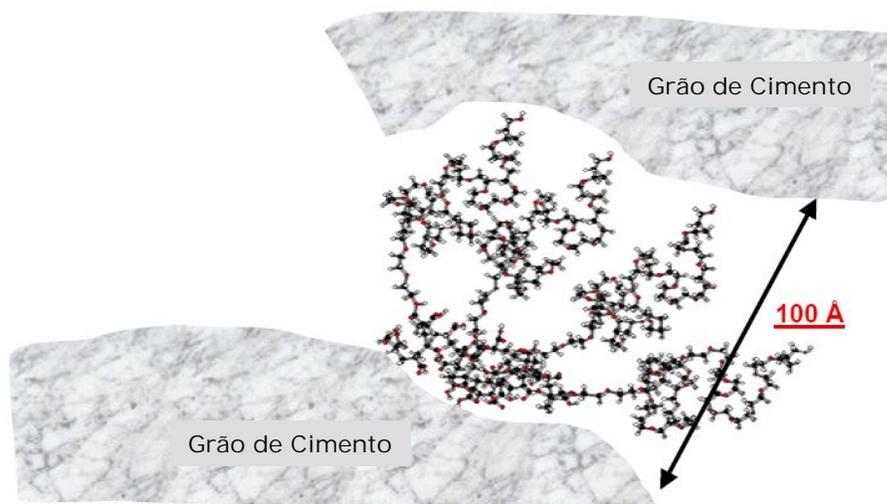


Figura 10 - Distância entre os grãos de cimento promovida pela atuação do aditivo de base policarboxilato (Manual técnico - Sika).

Na ausência de aditivos, as forças que se estabelecem entre as partículas de cimento são, em geral, de atração e tendem a produzir floculação dessas partículas em aglomerados de tamanho significativo que retêm a água. Quanto mais pronunciado for este efeito de floculação maior será a tensão de escoamento e a viscosidade da composição. A adsorção das moléculas de superplastificante pelas partículas de cimento impede a sua floculação, conforme Figura 11, devido à geração de forças repulsivas cuja origem pode ser eletrostática e/ou através de repulsão estérica. Conseqüentemente, as partículas são homoganeamente distribuídas na solução aquosa, liberando a quantidade de água aprisionada no interior dos flocos e minimizando a quantidade de água necessária para que estas fiquem dispersas, o que conduz a uma maior fluidez/trabalhabilidade do concreto (RONCERO et al., 2000 apud NUNES, 2001).

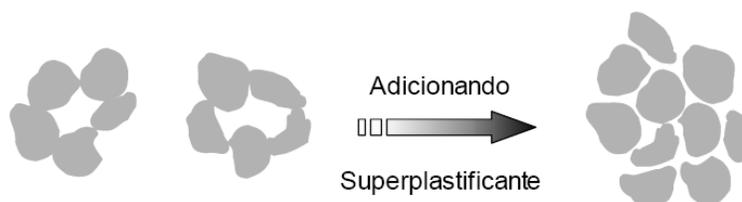


Figura 11 - Floculação e desfloculação das partículas de cimento (NUNES, 2001).

A fluidez do concreto auto-adensável está ligada diretamente à dosagem do aditivo superplastificante, que deve ser eficiente o bastante para promover a fluidez e mantê-la durante um determinado período requerido para sua aplicação. Para tanto se sabe que as recomendações técnicas do aditivo superplastificante de base policarboxilatos descrevem que o seu efeito sobre a fluidez deve durar cerca de 2 horas. Com isso, percebe-se a relevância deste tema quando aplicado ao concreto auto-adensável.

Perda e Manutenção da Fluidez do CAA

Em diversos trabalhos constata-se que o efeito do aditivo superplastificante não se mantém durante um período mínimo de duas horas e meia, o qual simula o tempo de transporte e descarga de um concreto produzido em central até chegar à obra.

Kordts e Düsseldorf (2003) salientam que se o espalhamento e o tempo de escoamento do CAA não se mantêm por um longo período de tempo com adequadas propriedades de auto-compactabilidade, a mistura deve ser restabelecida com uma redosagem de aditivo superplastificante de base de éter de policarboxilato. Em estudo realizado por estes autores, com concreto auto-adensável, mostrou que para um CAA com relação a/c de 0,64, com uma quantidade de água igual a 175 l/m^3 , utilizando 1,0 % de superplastificante (da massa de cimento, com teor de sólidos equivalente a 35%), a perda de fluidez com o tempo ocorreu, e de forma acentuada, conforme Figura 12. Após 60 minutos, houve a redosagem deste concreto com um incremento de 0,2 % deste aditivo, que elevou seu espalhamento deixando-o bem próximo do inicial. A partir desse ponto, a fluidez do CAA diminuiu mais sutilmente até o tempo de 150 minutos, permanecendo dentro da faixa requisitada.

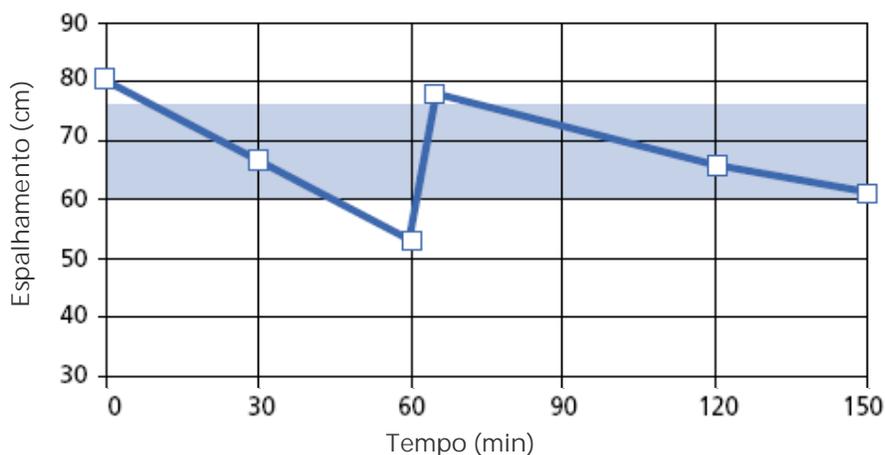


Figura 12 - Comportamento do espalhamento de um CAA no tempo com dosagem adicional após 60 minutos (KORDTS e DÜSSELDORF, 2003).

No presente trabalho, esse comportamento foi investigado somente em argamassas, pela maior praticidade na execução dos ensaios. Durante a realização dos ensaios em concreto, percebeu-se também, que neste período, o CAA perdia fluidez rapidamente. Desse modo, fazer uma redosagem de superplastificante ou utilizar um aditivo que sustente suas propriedades reológicas por um período que contemple o seu transporte e aplicação ainda se faz necessário. Ghezal (2003) observou que a perda de fluidez é muito dependente da dosagem e do tipo de superplastificante utilizado, e também que os CAAs com maior dosagem de APV, apresentaram melhores retenções de trabalhabilidade.

Melo et al. (2005), mediram a perda de fluidez para CAAs com fíler constituídos com materiais da região de Florianópolis e de características similares aos empregados neste trabalho. Constataram que a perda de fluidez foi superior a 20 % para quase todas as misturas após um tempo de 30 minutos, através dos ensaios de espalhamento, Funil-V e Caixa-L. Advertiram, então, que o uso do aditivo superplastificante de base policarboxilatos não confere a manutenção de fluidez por um período de 2 horas, como consta da literatura.

Um estudo envolvendo dois aditivos estabilizadores de hidratação foi desenvolvido no Laboratório de Materiais de Construção Civil da UFSC, com o intuito de manter a fluidez de argamassas auto-adensáveis com fíler calcário, com vista a estabilização do concreto. Porém, para se estabilizar essas argamassas por um período de duas horas e meia os teores encontrados de estabilizadores de hidratação foram muito elevados, de 1,5 e 4,0 % dependendo da marca, em relação à massa do cimento para o CP V ARI - RS. Para a reativação da mistura deve-se proceder com a adição de cimento ou aditivo acelerador de pega, para que a evolução da hidratação do cimento reinicie. Nestes termos, a aplicação do aditivo estabilizador de hidratação torna-se inviável no aspecto técnico e econômico de serem utilizados para a manutenção da fluidez.

2.8.4.2 Promotor de Viscosidade

Os agentes modificadores da viscosidade (VMA), ou promotores de viscosidade (APV) são aditivos químicos que melhoram substancialmente a coesão do concreto, pois limitam a perda de água por exsudação e minimizam a tendência de segregação do concreto (GETTU e AGULLÓ, 2003; REPETTE, 2005). Deste ponto de vista reológico, estes aditivos induzem no concreto uma viscosidade moderada-alta junto com um comportamento pseudoplástico, isto é, sua viscosidade plástica diminui ao aumentar o gradiente de velocidade aplicado.

Os aditivos promotores de viscosidade possuem cadeias poliméricas que na mistura incorporam água, adsorvem-na, incham entrelaçando-se, formando uma rede que retém a água e assim suspendem os grãos. Conseqüentemente, ocorre a diminuição da exsudação e o aumento da viscosidade da pasta, evitando a segregação dos agregados (REPETTE, 2005).

De acordo com a EFNARC (2005), o promotor de viscosidade (APV) também pode ser usado para ajudar a reduzir a segregação e a sensibilidade da mistura devido a variações de outros componentes, especialmente sobre a parcela de umidade. Desse modo, o APV atua na água da mistura promovendo uma viscosidade moderada, por meio da formação de uma rede que mantém as partículas finas da mistura suspensas, fornecendo maior coesão à mesma e evitando que ocorra sua segregação e exsudação.

Seu uso conjuntamente com superplastificantes de última geração permite obter concretos estáveis apesar de ter uma grande fluidez e, portanto, grande facilidade de mistura, bombeamento e colocação. Geralmente, a utilização dos aditivos promotores de viscosidade aumenta a dosagem de água e de superplastificante na mistura para alcançar a fluidez desejada no CAA. (GETTU, GOMES, AGULLÓ e BERNARD, 2001). Esse incremento na dosagem da água pode ser melhor observado na Figura 13, onde pode ser comparada a influência da presença ou não do aditivo promotor de viscosidade no espalhamento. Analisando esta mesma Figura pode ser inferido que há uma tendência da sensibilidade da mistura aos materiais constituintes ser mais reduzida com o emprego deste aditivo, pois com uma variação de 1% na umidade dos agregados (utilizados em quantidades típicas) ter-se-ia uma mudança no *slump flow* de aproximadamente 70 mm e 150 mm, respectivamente, com e sem aditivo promotor de viscosidade (DOMONE, 2005).

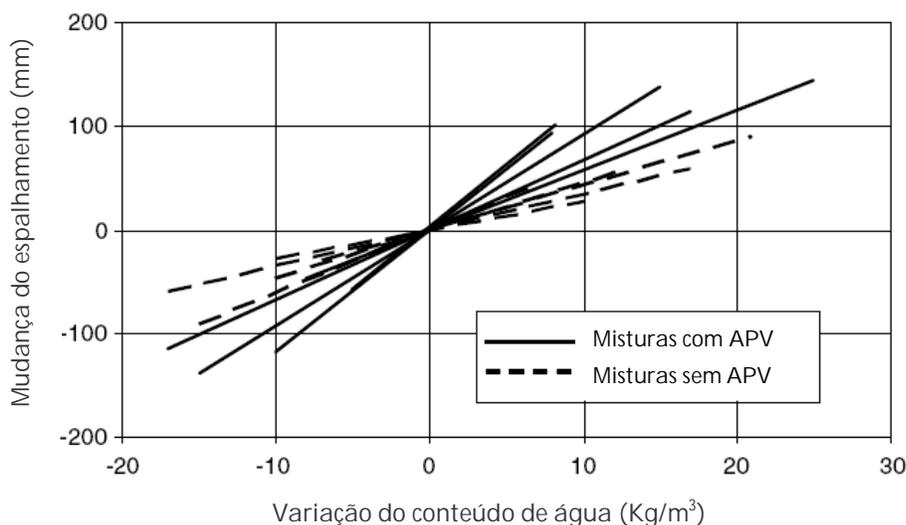


Figura 13 - Influência da variação de água na modificação do *slump flow* (DOMONE, 2005).

Dessa forma, de acordo com Domone (2005), o aditivo promotor de viscosidade é utilizado para promover a estabilidade da mistura e/ou reduzir a sensibilidade da variação dos materiais da mistura durante a confecção do CAA, particularmente da umidade dos agregados.

Sua aplicação é representativa quando verificada a frequência do emprego do APV em um trabalho, que reúne 68 estudos de caso de CAA compilados por Domone (2005) durante os anos de 1993 e 2003. Sendo que, desse total, 50 % dos casos utilizaram o aditivo promotor de viscosidade.

Dos promotores de viscosidade, destacam-se os éteres de celulose e o *welan gum* da classe A. Os éteres de celulose são constituídos por uma cadeia linear de moléculas de glicose, a qual consiste numa base forte para fazê-los solúveis em água. Possuem numerosas pontes de hidrogênio inter e intra moleculares que lhe conferem uma configuração helicoidal que se envolve de forma aleatória. Por outro lado, o *welan gum* é um polissacarídeo natural de alto peso molecular produzido mediante fermentação aeróbica que forma uma dupla hélice com uma configuração de barra rígida mediante pontes de hidrogênio. O comportamento pseudoplástico depende da conformação destas hélices e, neste sentido, os que têm forma de barra rígida, como o *welan gum*, dispõem de um comportamento mais pseudoplástico. Macroscopicamente, o *welan gum* possui maior viscosidade para baixos gradientes de velocidade, e quando se aplicam gradientes de velocidade elevados a sua viscosidade diminui muito mais.

O emprego do APV não é imprescindível para obter um concreto auto-adensável, unicamente no caso em que os finos por si só não sejam capazes de promover suficiente coesão à mistura. Seu emprego pode contribuir para homogeneizar a qualidade destes concretos e facilitar sua produção (OKAMURA et al., 2000; SUBRAMANIAN e CHATTOPADHYAY, 2002 apud GETTU e AGULLÓ, 2003). Desse modo, os promotores de viscosidade servem para a correção de composições cujo suprimento de materiais constituintes sofre grande variação. E quando são empregados em doses elevadas, espera-se um aumento da retração de secagem (REPETTE, 2005).

O emprego do promotor de viscosidade é de caráter opcional à mistura de concreto, mas por ser um material de ampla disponibilidade comercial e de fácil aquisição, torna-se interessante ensaiá-lo com agregados miúdos que apresentam elevadas frações de finos. Desconsiderando, desse modo, a parcela de finos adicionada à composição do CAA com o

intuito de ampliar a possibilidade de seu uso em qualquer lugar, sem ser preciso ficar limitado à questão da disposição de materiais finos na região.

Para se obter um CAA com alta coesão e propriedades auto-compactáveis necessita-se de uma correta otimização da composição da pasta de cimento, em geral, e da combinação água, superplastificante, APV, em particular. A incorporação de promotor de viscosidade afeta negativamente a fluidez do concreto e, por tanto, para obter uma determinada trabalhabilidade se deve incrementar a quantidade de água e/ou a dosagem de superplastificante.

O bom desempenho do APV é função da compatibilidade entre os aditivos da mistura, entre eles e o cimento, bem como da seqüência de adição e da forma de mistura do CAA (REPETTE, 2005), e sua eficiência depende de diversos fatores, como elevados teores de cimento e temperaturas altas. Por outro lado, uma elevada quantidade de finos com módulo de finura menor que 2,6 pode impedir o bombeamento devido à alta coesão do concreto com APV (RIXOM e MAILVAGANAM, 1999).

A incompatibilidade entre os promotores de viscosidade e superplastificantes é causada pela capacidade destes se adsorverem sobre as partículas de cimento (MAILVAGANAM, 1999). Neste caso o aumento da viscosidade é conseguido à custa de uma redução na fluidez, pois a adsorção do promotor de viscosidade acaba por impedir a ação do superplastificante na superfície do cimento.

Em geral, os promotores de viscosidade podem chegar a incorporar elevados teores de ar devido a suas propriedades surfactantes (composto que reduz a tensão superficial de uma solução, tensoativos) (RIXOM e MAILVAGANAM, 1999). Os APVs de base éter de celulose podem ter uma grande atividade superficial na interface ar/água e incorporar ar no concreto. Por este motivo, em certas ocasiões, empregam-se junto com o APV, um agente antiespumante.

No estado endurecido do concreto, numerosos autores (SKAGGS et al., 1994; RIXOM e MAILVAGANAM, 1999; KHAYAT e SARIC-CORIC, 2000) têm observado uma ligeira redução da resistência à compressão do concreto, especialmente nas primeiras idades, devido à incorporação de doses médias a altas de promotor de viscosidade. Entretanto, Khayat e Saric-Coric (2000) obtêm um leve incremento da resistência à compressão quando empregam doses baixas de *welan gum*. Assim mesmo, os autores argumentam que a diminuição da resistência em idades iniciais deve-se, fundamentalmente, ao atraso da hidratação devido à

incorporação do *welan gum* e a menor disponibilidade de água por uma parte da mesma, estar retida pelo promotor de viscosidade.

Além disso, Khayat (1995) supõe que a diminuição da área de cimento exposta proveniente da adsorção do APV também contribui para retardar a hidratação do cimento. A diminuição da resistência nas maiores idades parece estar relacionada com o aumento de ar aprisionado e o aumento da quantidade de poros capilares maiores quando na presença do promotor de viscosidade.

2.8.5 Água

A água para a mistura do CAA deve obedecer às mesmas exigências estabelecidas para a água de mistura do concreto convencional, ou seja, que atenda os requisitos de potabilidade.

Um conteúdo de água excessivo conduz à segregação e a um mau desempenho do concreto endurecido, em termos de resistência e durabilidade (METHA e MONTEIRO, 1994).

2.9 Ensaios Correntes em Concretos Auto-Adensáveis

Sabe-se que para avaliar a trabalhabilidade de um concreto convencional geralmente se recorre ao ensaio de abatimento do cone de Abrams *slump test*. Embora não se possa dispor dessa opção para o CAA, pois traria sérios prejuízos a sua análise, recorre-se a outros métodos de ensaios que possibilitem estudar suas principais propriedades: capacidade de preenchimento, capacidade de passar por espaços estreitos e resistência à segregação, de forma apropriada. Dentre os diversos ensaios existentes que medem a trabalhabilidade do CAA, pode-se listar os principais e os mais aceitos para avaliar suas características com o objetivo de verificar suas conformidades. Os ensaios mais empregados correntemente para este fim encontram-se na seqüência.

Nenhum ensaio por si só pode medir todos os parâmetros chave, pois se requerem combinação dos mesmos para caracterizar plenamente uma mistura de CAA (EFNARC, 2005).

2.10 Espalhamento (Slump Flow) e T₅₀₀

O ensaio de espalhamento (*slump flow*) e do tempo T₅₀₀ são métodos para caracterizar a fluidez e a velocidade de escoamento do concreto auto-adensável na ausência de obstruções. O tempo T₅₀₀ é também uma medida da velocidade do fluxo e da viscosidade do CAA (EFNARC, 2005).

Este é realizado com o auxílio do cone de Abrams, molde em forma de cone que serve para determinar a capacidade de se deformar e de preenchimento quando sujeito à ação do seu peso próprio e da resistência oferecida pelas paredes do cone. E é um dos métodos mais práticos e por isso mais utilizado para avaliar a consistência do CAA.

No ensaio T₅₀₀ se mede o tempo do início do movimento quando o tronco de cone é levantado desde o início do movimento vertical do cone até que concreto ter fluído na marca de 500 mm de diâmetro, sendo este é o valor do tempo T₅₀₀. Mede-se o maior diâmetro da extensão do fluxo do concreto e o diâmetro da extensão perpendicular a este e a média é o espalhamento. Pode-se também fazer uma avaliação visual da mistura, para verificar a ocorrência de segregação ou exsudação. As representações ilustrativas destes ensaios seguem na Figura 14.

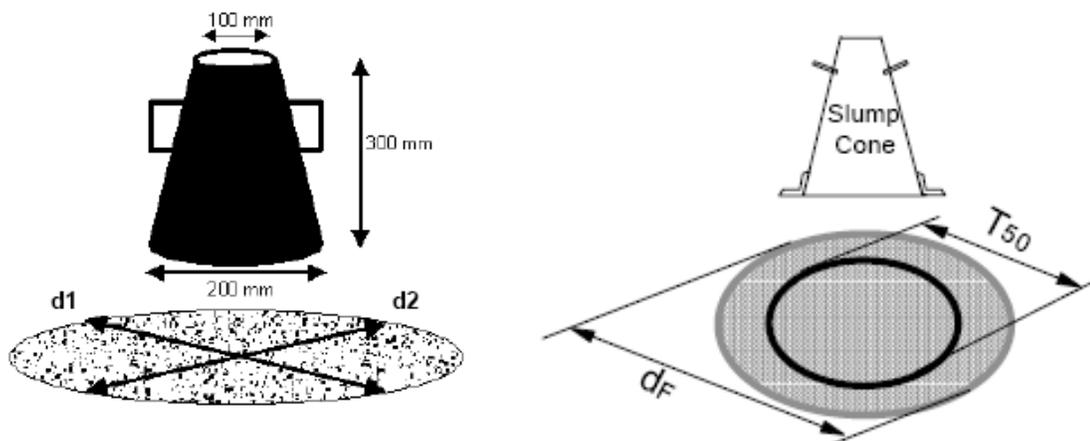


Figura 14 - Ensaio de espalhamento e T₅₀₀, respectivamente.

2.10.1 Funil-V

Avalia a capacidade do concreto auto-adensável passar através de espaços restritos, por meio do funil em V, de dimensões mostradas na Figura 15, e também sua fluidez e viscosidade.

Deve-se colocar uma amostra de concreto no funil até preenchê-lo totalmente, sem compactá-la. Põe-se um recipiente debaixo do mesmo para recolher o concreto em sua queda, então, abri-se a comporta e mede-se o tempo de escoamento com auxílio de um cronômetro.

Este ensaio não é adequado se o tamanho máximo dos agregados superar os 20 mm (EFNARC, 2005).

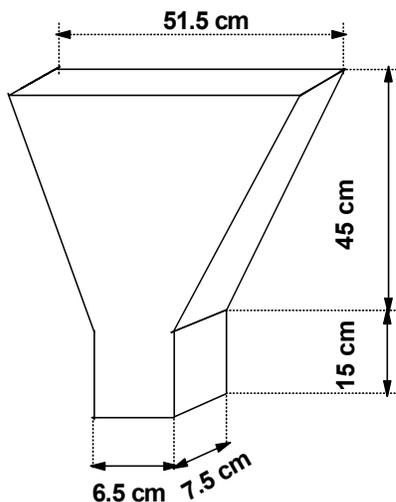


Figura 15 - Ensaio e dimensões do Funil-V.

2.10.2 Caixa-L

O ensaio a Caixa-L mede a fluidez do concreto simultaneamente com a habilidade deste de passar por obstáculos, permanecendo coeso (EFNARC, 2005; GOMES, 2002).

Este ensaio é utilizado para averiguar a capacidade de passagem do CAA, de fluir através de espaços estreitos, neste caso espaçamento entre as barras, sem segregação. Existem duas variantes; o ensaio de dois ou três obstáculos de barras. Sendo que, o ensaio de três obstáculos de barras simula uma armadura mais densa.

Neste ensaio, dispõe-se de uma caixa em forma de L, sendo que existe uma grade ou barras de aço paralelas que servem de obstáculo para a passagem do concreto no sentido vertical para o horizontal, onde é avaliada a capacidade do concreto passar através das armaduras por ação do seu peso próprio, averiguando a capacidade de deformabilidade, segregação e bloqueio.

A capacidade de passagem (PA) ou chamada razão de bloqueio é calculada pela razão entre as alturas h_2 (altura máxima atingida pelo concreto na extremidade horizontal da caixa L) e h_1 (altura final do concreto na parte vertical da caixa L, após o termino do escoamento), mostradas na Figura 16.

Pode-se também medir o tempo que o CAA leva para atingir as distâncias de 20 e 40 cm ao longo do eixo horizontal, mostrados na Figura 176 definindo-se como adequados tempos menores que um e dois segundos, respectivamente (GOMES, 2002).

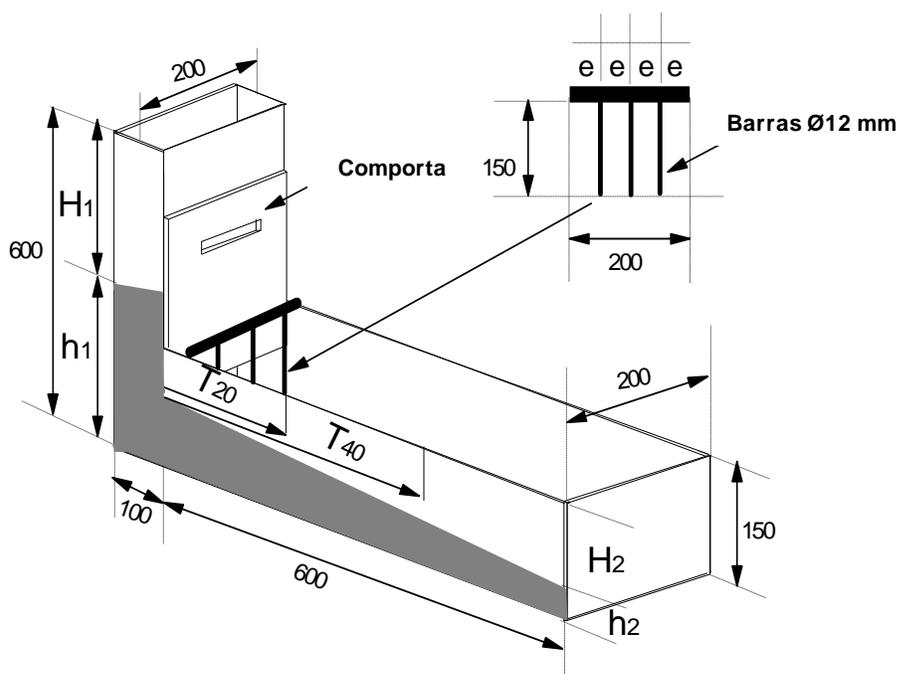


Figura 16 - Ensaio e dimensões da caixa-L.

2.10.3 Caixa-U

Mede a mesma capacidade do concreto passar por uma restrição pela ação do peso próprio e a viscosidade, verificando-se dessa forma, a auto-compactabilidade do concreto através da altura final alcançada pelo mesmo, utilizando uma caixa em formato U, conforme observado na Figura 17, empregando o princípio dos vasos comunicantes. Sugere-se ainda a medição do tempo decorrente até a estabilização da mistura, definindo como adequado quando se dá entre 5 e 10 segundos (COPPOLA, 2001 apud MELO, 2004).

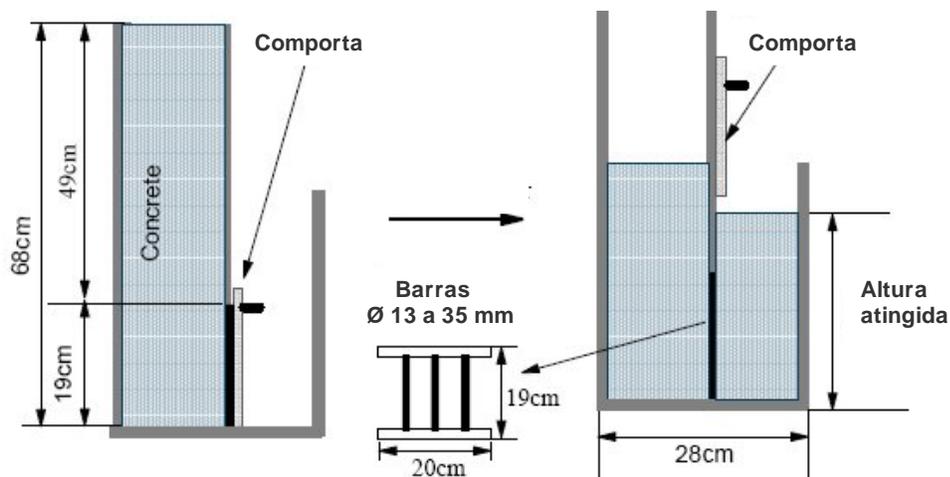


Figura 17 - Ensaio da caixa-U e suas dimensões.

2.10.4 Orimet

Apresenta cilindro suportado por um tripé, disposto na vertical sendo que sua parte interna tem forma de um cone, estreitando-se de cima para baixo, e no fundo há uma comporta de abertura rápida para fechar o orifício. O procedimento de ensaio se dá pelo preenchimento do tubo com o CAA e medir o tempo de escoamento completo do concreto e verificar o total descarregamento do concreto. Este teste fornece a capacidade de distinção das composições de CAA com deformabilidades diferentes. O Orimet está representado esquematicamente na Figura 18.

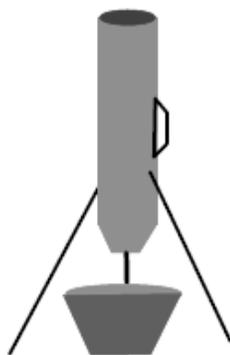


Figura 18 - Ensaio de Orimet.

2.10.5 Anel japonês

Consiste em um anel (*J-ring*), atualmente, de seção retangular sendo que em seu interior pode-se dispor de várias combinações de diâmetros de barras e espaçamentos entre elas, este anel é ligado a barras verticais para serem colocados sobre uma superfície. Neste

ensaio permite-se ajustar as condições de bloqueio para simular as condições reais da armadura, onde o bloqueio é medido pela razão entre as alturas médias do concreto retido no interior do anel e fora dele. Pode ser utilizado juntamente com o Orimet ou *Slump flow*, dando-lhes a capacidade de medir a resistência ao bloqueio. A representação do anel é mostrada na Figura 19.

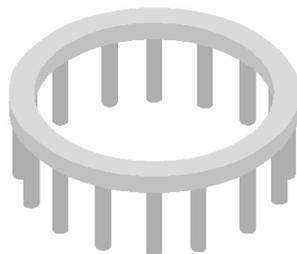


Figura 19- Anel japonês.

2.10.6 Orimet e Anel japonês

Os dois últimos ensaios descritos: Orimet e Anel japonês são utilizados na maioria das vezes em conjunto, conforme pode ser observado na Figura 20, pois possibilitam avaliar a fluidez do CAA, detectar sua resistência à segregação e verificar seu bloqueio potencial.

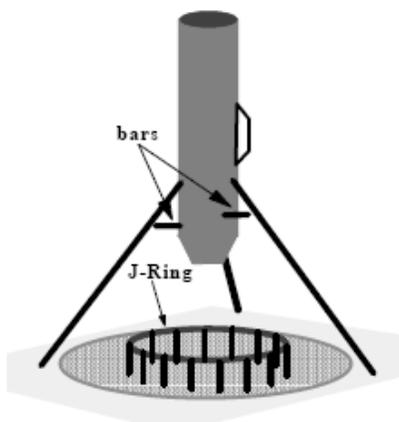


Figura 20 - Ensaio de Orimet e anel japonês em conjunto.

2.10.7 Critérios de aceitação do CAA

Sabendo-se que o que define o CAA são suas características no estado fresco, deve-se assim, verificar se o concreto tem resistência à segregação e habilidades de preenchimento e de passar por restrições, tanto na produção como no recebimento do concreto (REPETTE, 2005). A Tabela 2 apresenta os valores aceitáveis para cada um dos ensaios já citados de acordo com a literatura.

Tabela 2 - Faixas de resultados para a avaliação do CAA em termos de deformabilidade e resistência ao bloqueio.

	Nunes (2001)	Coppola (2001)	EFNARC (2002)	Gomes (2002)	EFNARC (2005)	Repetto (2005)
Slump flow (mm)	600 - 700	≥ 600	650 - 800	600 - 700	550 - 850	≥ 600
t_{50} - Slump flow (s)	-	5 - 12	3 - 7	4 - 10	3,5 - 6	2 - 5
Funil-V (s)	10	2 - 12	6 - 12	10 - 15	≤ 8	3,5 - 10
Caixa-U (mm)	300	≥ 300	-	≥ 300	≥ 300	-
Caixa-L (h_2/h_1)	$\geq 0,8$	$\geq 0,8$	0,8 - 1,0	$\geq 0,8$	$\geq 0,8$	-
Orimet (s)	-	-	0 - 5	< 3	-	-
J-ring (mm)	-	-	0 - 10	-	-	-

Na confecção deste trabalho utilizaram-se quatro destes ensaios, sendo eles, os mais difundidos na literatura: *slump flow*, funil-V, caixa-L e caixa-U. Estes ensaios fornecem bons resultados para a avaliação do CAA em laboratório e também para o recebimento do concreto em obra.

2.11 Ensaios Correntes em Argamassas

A EFNARC (2005) menciona que para se testar as argamassas e calcular o fluxo dos componentes da pasta e da argamassa do CAA tem-se usado um cone pequeno para medir o espalhamento e ensaios de funil, que medem a fluidez da argamassa. Suas dimensões encontram-se alocadas nas Figura 21 e Figura 22.

O cone de Marsh se usa para calcular a caracterização da fluidez dos componentes da pasta e da argamassa.

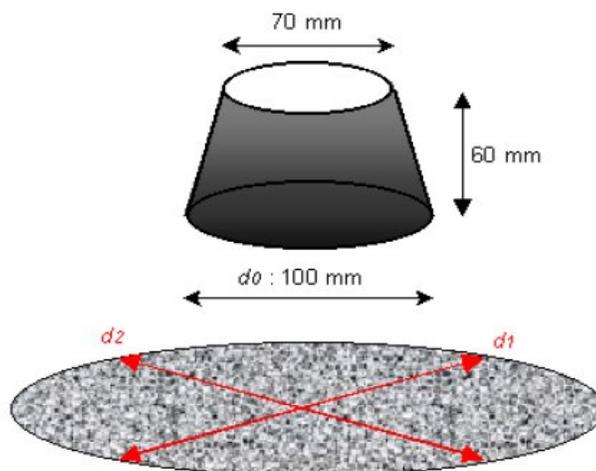


Figura 21 - Cone usado para o ensaio de espalhamento em argamassa.

2.12 Métodos de Dosagem

Um método teórico de dosagem que possa ser usado universalmente com qualquer combinação de cimento portland, materiais cimentícios suplementares, quaisquer agregados e quaisquer aditivos, será sempre difícil de resolver, já que os critérios de aceitação destes materiais, apesar de serem normalizados, são amplos demais (AÏTCIN, 2000).

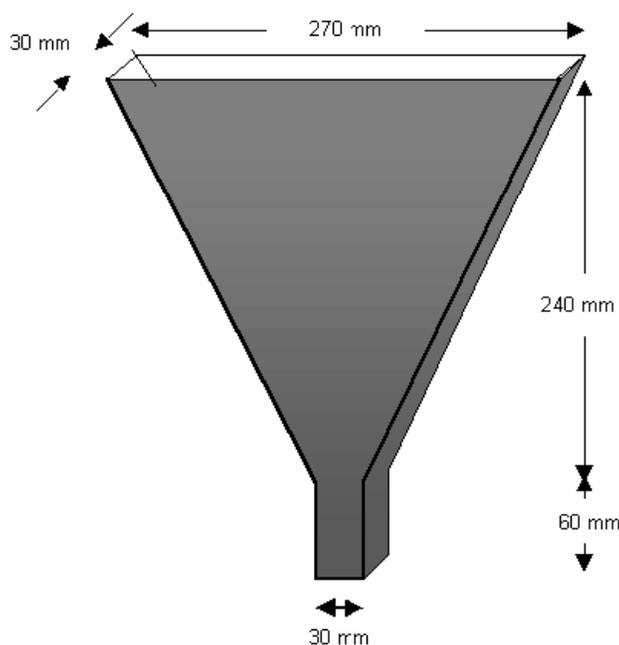


Figura 22 - Funil-V para ensaio de fluidez em argamassa.

O proporcionamento da mistura a que se escolhe serve para satisfazer todos os critérios de realização do concreto, tanto em estado fresco como endurecido (EFNARC, 2005).

A dosagem do CAA requer o atendimento de vários requisitos simultaneamente no estado fresco como à elevada fluidez, capacidade de passar por espaços estreitos, de se mover sob a ação de seu peso próprio e resistência à segregação e resistência satisfatória no estado endurecido. Por isso, o proporcionamento do CAA torna-se mais trabalhoso e mais complexo em cumprimento às condições estabelecidas (REPETTE, 2005).

2.12.1 Princípios de dosagem

Os princípios, segundo a EFNARC (2005), a serem seguidos para alcançar as propriedades requeridas em uma mistura do CAA no estado fresco são:

- Ajustar e fazer o balanço da fluidez e a viscosidade da pasta mediante uma seleção e proporção de cimento e as adições, limitando a relação água/finos. Na seqüência acrescentar um superplastificante e (opcionalmente) um aditivo promotor de viscosidade. A razão para se conseguir uma boa capacidade de preenchimento, capacidade de passagem e resistência à segregação é controlar corretamente estes componentes do CAA, sua compatibilidade e interações.
- Para controlar o aumento de temperatura e as fissuras por retração térmica que afetam a resistência, os finos deverão conter uma proporção significativa de adições para manter o conteúdo de cimento a níveis aceitáveis, ou usar cimentos com adições.
- A pasta é o veículo para o transporte dos agregados; portanto o volume da pasta deverá ser maior que o volume de vazios dos agregados, pois dessa forma se garante que todas as partículas individualmente serão totalmente recobertas e lubrificadas por uma camada de pasta. Isto incrementa a fluidez e reduz o atrito dos agregados.
- A relação de agregados graúdos e miúdos na mistura se reduz para que cada grão de agregado graúdo esteja plenamente recoberto por uma camada de argamassa. Isto reduz a possibilidade de bloqueio e segregação dos agregados quando o concreto passa através de aberturas estreitas ou espaços entre a armadura e incrementa a capacidade de passagem do CAA.

Diante desses princípios de dosagem se obtém um concreto que, comparado com um concreto convencional, normalmente apresenta menor conteúdo de agregados graúdos; maior conteúdo de pasta; menor relação água/finos; aumento de superplastificante e opcionalmente aditivos promotores de viscosidade.

De acordo com EFNARC (2005) a dosagem da mistura de CAA compreende os seguintes aspectos:

- Avaliar a demanda de água e otimizar o fluxo e a estabilidade da pasta;
- Determinar a proporção de areia e a dose de aditivos para ter uma consistência estável;
- Ensaiar a estabilidade a pequenas variações de proporções;
- Acrescentar uma quantidade adequada de agregados graúdos;
- Produzir o CAA em estado fresco no misturador de laboratório, realizando os ensaios necessários;
- Fazer ensaios das propriedades do CAA no estado endurecido.

2.12.2 Considerações

É difícil prever o comportamento do CAA, de modo geral, pois os seus componentes apresentam uma elevada gama de variações que provocam desempenhos distintos à mistura. Dessa forma, salientam-se alguns fatores que podem contribuir para que existam variações no proporcionamento dos materiais como:

- os tipos de adições inertes e reativas sujeitas ao uso no CAA, suas distribuições granulométricas, forma de grãos e interações com o cimento e aditivos;
- diferentes marcas de aditivos, dosagens e composições, desempenhos, compatibilidades cimento/aditivos e aditivo/aditivos, interações, eficiência e tempo de atuação;
- diferentes cimentos que podem ser empregados, com variadas especificações e teores de adições;
- tipos de agregados, origem, granulometria e forma;

Neste sentido, por estes e outros motivos, podem ocorrer oscilações no comportamento das misturas, devendo-se para tanto, ter muita cautela, atenção e cuidado na escolha dos materiais a serem empregados no CAA, bem como a manutenção do fornecimento dos mesmos. Além disso, cabe salientar que alguns de seus constituintes devem ser estudados, analisados e testados previamente à sua utilização, para o emprego no CAA.

Para que o CAA seja capaz de fluir e não segregar deve-se proporcionar uma mistura equilibrada para promover a homogeneidade da mesma.

2.12.3 Estratégias de dosagem

Segundo Repette (2005) os métodos de dosagem seguem três estratégias de dosagem atualmente:

- Preenchimento do esqueleto granular: Baseia-se na definição, de forma prática ou teórica, da composição de agregados graúdos que resulte no maior empacotamento das partículas. O esqueleto de agregados forma-se a partir da inserção do agregado miúdo de forma a obter o menor índice de vazios. A pasta é definida ajustando-se os teores de cimento, água, aditivos e eventualmente adições. Atendidos os requisitos de fluidez e estabilidade da mistura, em geral, pelos ensaios do funil de Marsh, do *mini-slump*, da mesa de consistência e dos reômetros, depois incorporada ao esqueleto granular.
- Controle da segregação: A definição das propriedades da pasta é obtida através de conhecimentos teóricos evitando a ocorrência de segregação dos agregados do CAA. Nesta estratégia de dosagem existem autores que contemplam o método de dosagem

denominando-o teoria do controle de segregação e assumem que as propriedades reológicas da pasta governam a fluidez e a resistência à segregação do CAA. A partir de uma composição de agregados são definidas a densidade, a tensão de escoamento e a viscosidade da pasta para estabelecer um equilíbrio de forças sobre as partículas para evitar a segregação do concreto. São realizados ensaios nas misturas de concreto na caixa U para ajuste da relação pasta/agregados.

- ***Incorporação de agregado em pasta:*** A composição da pasta é definida através de ensaios que satisfaçam as condições de capacidade de escoamento e resistência à segregação, o teor de aditivo superplastificante é obtido com base no teor de saturação da pasta. Incorpora-se à pasta o agregado miúdo para encontrar o teor de areia na pasta, através dos ensaios de espalhamento e de escoamento da mistura. Experimentalmente, define-se a composição dos agregados graúdos para que haja um elevado grau de empacotamento dos grãos. Por fim, o agregado graúdo é incorporado à argamassa determinando-se experimentalmente o teor ótimo de agregado no CAA. Nas fases de composição de argamassa e do concreto é ajustado o teor de aditivos, inicialmente obtido nos ensaios em pasta.

Os métodos de dosagem de misturas para CAA diferem dos métodos tradicionais empregados no concreto. Nestas misturas a obtenção das propriedades no estado fresco associadas à alta fluidez, viscosidade moderada e coesão governam a definição das proporções dos componentes. Na bibliografia são vários os procedimentos apresentados para a obtenção de misturas de CAA.

A seguir seguem algumas definições de métodos de dosagem utilizados em CAA.

2.12.4 Método proposto por Okamura et al. (1997)

Este procedimento considera que o concreto se constitui em duas fases: agregado graúdo e argamassa. O volume de agregado se fixa, respectivamente, em 50 % do volume sólido do esqueleto granular (agregado miúdo e agregado graúdo) e 40 % de areia do volume de argamassa. Tais proporções foram determinadas mediante estudos de caráter experimental relativos ao bloqueio dos agregados. A relação água/finos e a dosagem do superplastificante são obtidas por meio de ensaios de fluidez em argamassas (GETTU, GOMES, AGULLÓ e BERNARD, 2001). A Figura 23 ilustra esta metodologia de dosagem.

Para que o concreto dosado cumpra os requisitos de auto-autocompactibilidade e de estabilidade da mistura, deve possuir (OKAMURA e OUCHI, 2003):

- Quantidade de agregados limitada;
- Relação água/cimento baixa;
- Altas dosagens de aditivo superplastificante.

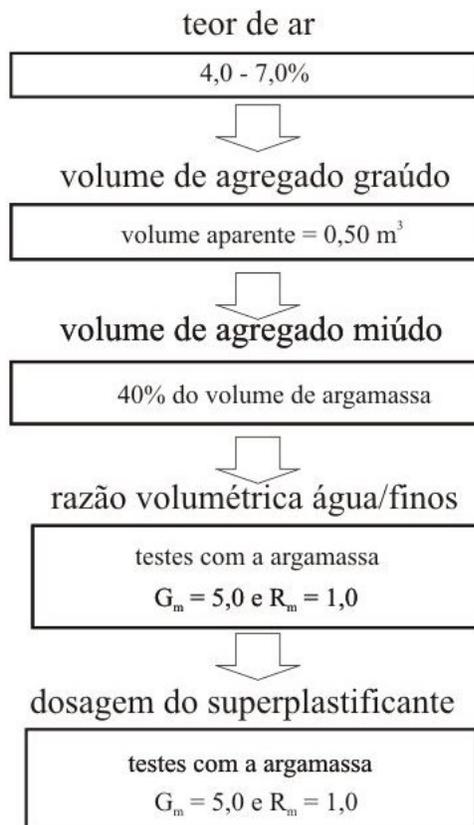


Figura 23 - Metodologia de dosagem proposta por Okamura et al (NUNES, 2001).

De acordo com este método, o ajuste da razão água/finos e da dosagem de superplastificante passa inicialmente pela realização de ensaios com a argamassa, recorrendo a dois tipos de ensaios, o de espalhamento (*slump flow*) e o de fluidez (Funil-V) que fornecem os parâmetros $\Gamma_m = G_m$ (diâmetro de espalhamento relativo) e R_m (tempo de escoamento relativo), respectivamente. A argamassa adequada para um CAA deverá conduzir simultaneamente a $\Gamma_m = 5,0$ e $R_m = 1,0$, a que corresponde uma elevada deformabilidade e suficiente viscosidade, respectivamente. O ensaio de espalhamento da argamassa é realizado em um molde de forma tronco cônica, medindo-se o diâmetro de abertura da mistura, a partir do qual se determina a área de espalhamento relativa (Γ_m), conforme Equação 4 apresentada:

$$\tau_m = \left(\frac{dm}{d_0} \right)^2 - 1,0 \quad (4)$$

Onde d_m é o diâmetro medido após o espalhamento da argamassa e d_0 é o diâmetro inicial que é igual a 100 mm.

No ensaio de fluidez determina-se o tempo (t) necessário para o escoamento da argamassa, calculando-se, posteriormente, o tempo de escoamento relativo (R_m), obtido pela Equação 5:

$$R_m = \frac{10}{t} \quad (5)$$

Domone e Jin (1999) fornecem sugestões para $\Gamma_m = 8$ correspondentes a diâmetros de espalhamento = 300 mm e R_m de 1 a 5, correspondentes a tempos de fluxo de 2 a 10 s. Os valores de Γ_m entre 3 e 7, correspondem a diâmetros de espalhamento da argamassa de 200 mm a 283 mm e valores de R_m entre 1 e 2, correspondentes aos tempos de escoamento de 5 a 10 s de acordo com Edamatsu et al. (1999).

Seguindo com a determinação do método de Okamura, para encontrar o teor de aditivo ideal nas argamassas deve ser respeitada a relação $\Gamma_m/R_m = 5,0$.

E para verificar a relação água/finos, a relação apresentada pela Equação 6 se faz necessária:

$$\frac{R_m}{G_m^{0,4}} = 0,525 \quad (6)$$

E em concreto, o teor de ajuste de superplastificante é verificado através da capacidade de enchimento do CAA pelo ensaio da caixa-U.

Estes parâmetros de deformabilidade - Γ_m e viscosidade - R_m são relacionados por Okamura e Ouchi (2003), e fornece a distribuição dos resultados de argamassas referenciando-os com a auto-compactabilidade do CAA com o conteúdo de agregado graúdo fixado.

Segundo Okamura e Ouchi (2003) esta relação serve para otimizar a combinação da deformabilidade e viscosidade da argamassa para encontrar a auto-compactabilidade do concreto fresco.

2.12.5 Método proposto por Sedran et al. (1996)

Sedran et al. (1996) propõe um método que consiste na utilização de um modelo computacional mediante o qual se estabelece um esqueleto granular compacto com o mínimo

de vazios, considerando o efeito parede e a viscosidade da mistura. A dosagem de finos se fixa inicialmente, dependendo da resistência e dos materiais disponíveis. O teor de superplastificante é definido através do ensaio do cone de Marsh, para as possíveis combinações de finos. O ajuste final da água e de superplastificante para obter uma viscosidade aceitável se realiza utilizando um reômetro de ensaio de extensão de fluxo (GETTU, GOMES, AGULLÓ e BERNARD, 2001).

2.12.6 Método proposto por Gomes (2002)

O procedimento de Gomes (2002), esquematizado na Figura 24, assume que o CAA de alta resistência (deve atingir resistência mínima de 50 MPa aos 7 dias) pode ser obtido por duas fases separadamente: otimização da composição da pasta e do esqueleto granular, atendendo aos requisitos das propriedades desejadas para este concreto. Para atender a esta metodologia, as seguintes condições devem ser cumpridas:

- A relação água/aglomerante deve ser baixa ($< 0,40$);
- Otimizar as relações de aditivo superplastificante/cimento e finos/cimento para que se obtenha pasta com alta fluidez e boa coesão;
- Determinar um esqueleto granular com mínimo teor de vazios;
- Determinar o teor de pasta com as características de auto-adensabilidade do concreto fresco, bem como a resistência à compressão.

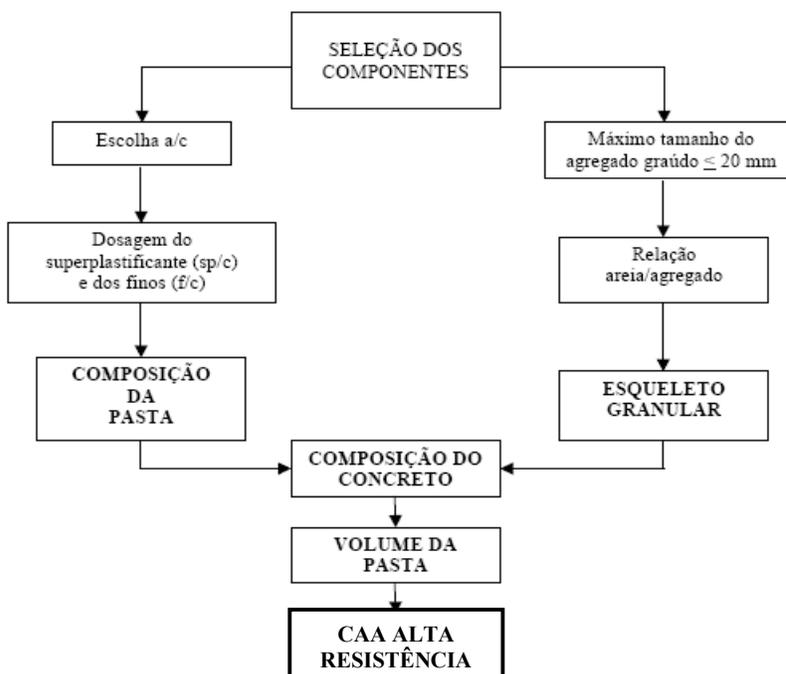


Figura 24 - Metodologia de dosagem para o CAA de Alta Resistência proposta por Gomes, 2002.

2.12.7 Método proposto pela CBI (2002)

O proporcionamento proposto pelo Swedish Cement and Concrete Research Institute (CBI) (2002) baseia-se em determinar a proporção ótima entre o agregado graúdo e o agregado miúdo, a fim de minimizar o volume de pasta. A pasta é necessária para preencher os espaços vazios da fase sólida e para envolver as partículas dos agregados, por isso é preciso determinar a distância média entre estas partículas, chegando-se ao volume de vazios da fase sólida compactada. Dessa forma, o volume total de agregado graúdo é determinado, em relação ao total de agregados para uma quantidade mínima de pasta e uma distância máxima inter-partículas sem que ocorra bloqueio. Por fim, realiza-se um estudo reológico em pasta para encontrar as quantidades de finos e aditivos, chegando-se ao volume de pasta mínimo (NUNES, 2001). Em seguida, são avaliadas as propriedades de auto-compactabilidade do concreto.

2.12.8 Método Repette-Melo (2005)

Método desenvolvido na Universidade Federal de Santa Catarina para a dosagem de CAA contendo filer calcário, que para o proporcionamento do concreto baseia-se na resistência à compressão solicitada (MELO, 2005; REPETTE, 2005). Este método fundamenta-se na incorporação de agregado em pasta, onde a resistência desejada é definida pela relação água/cimento. Dessa forma, parte-se da incorporação de filer, dotado de partículas menores que 0,075 mm, à pasta de cimento com vistas à relação água/cimento para a resistência desejada, num teor tal que não ocorra exsudação e segregação dos finos da pasta. Na seqüência, determina-se a relação agregado miúdo/argamassa e o teor de aditivo superplastificante para que a argamassa atenda os requisitos de espalhamento (*slump flow*), compreendendo uma faixa de abertura para argamassa entre 200 a 280 mm, e escoamento através dos ensaios de funil-V com faixa delimitada de 5 a 10 s. E esta faixa de abertura baseia-se nas proposições de Edamatsu et al (1999), que determinou uma ampliação para as proposições de Okamura, que pode ser visualizado na Figura 25. O teor de filer, então, é ajustado na argamassa, avaliando-se a auto-compactabilidade e a economia das misturas. O agregado graúdo deve apresentar composição tal que resulte no menor teor de vazios no ensaio de massa unitária no estado solto, e granulometria enquadrada em faixas granulométricas delimitadas pelas faixas mais utilizadas na literatura. Seu teor e o ajuste final do teor de aditivo superplastificante são realizados no concreto. Estes requisitos são cumpridos por meio dos ensaios de espalhamento numa faixa delimitada entre 600 e 700 mm

de abertura, funil-V, com intervalo menor que 10 s e caixa-L com razão de bloqueio (h_2/h_1) $\geq 0,8$. A Figura 32 apresenta o fluxograma deste método. E verifica-se a resistência à compressão na argamassa e no CAA.

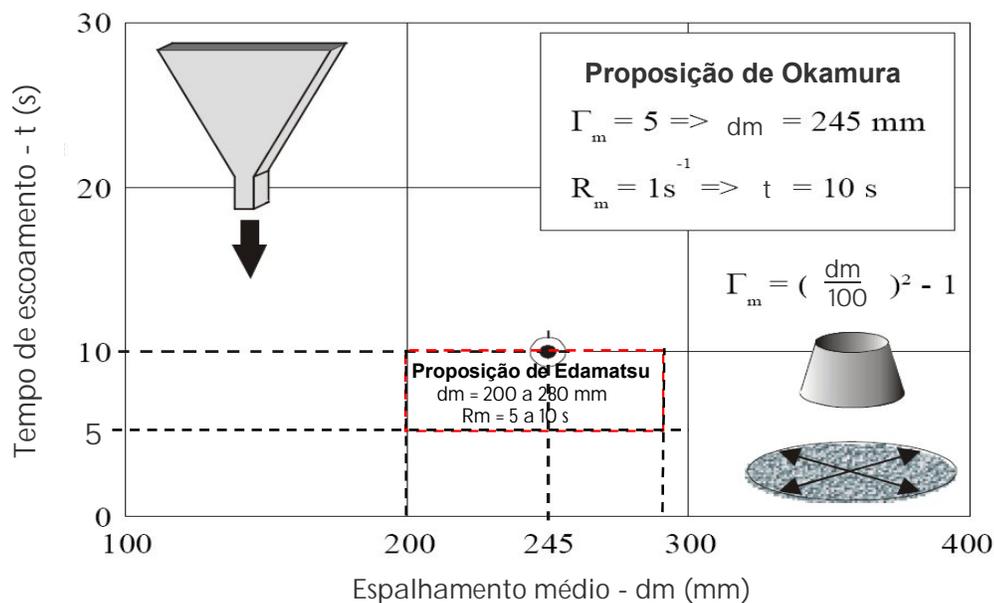


Figura 25 - Faixas de espalhamento e tempo de escoamento propostas por Okamura (1997) e Edamatsu et al. (1999), (KORDTS, 2005).

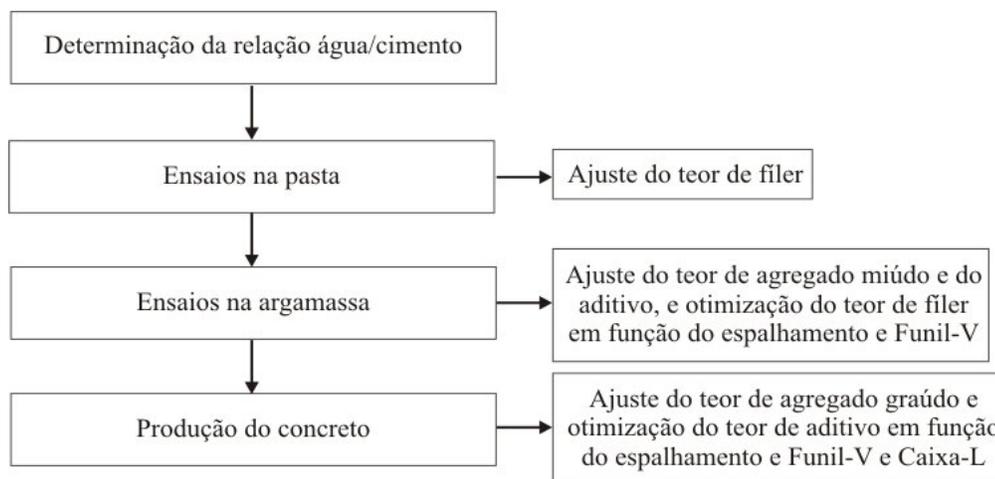


Figura 32 - Fluxograma do Método Repette-Melo (MELO, 2005).

2.12.9 Análise Crítica dos Métodos Descritos

O que rege a auto-compactabilidade do CAA são suas características no estado fresco através de suas propriedades fundamentais de capacidades de preenchimento e de passagem e resistência à segregação, portanto, a maioria dos métodos de dosagem contempla essas propriedades para o proporcionamento dos materiais. Assim, acabam desconsiderando os

parâmetros de dosagem que envolvem as propriedades do concreto no estado endurecido como por exemplo, a resistência à compressão nos métodos de dosagem propostos por Okamura et al (1997), Sedran et al (1996) e CBI (2002).

De uma forma abrangente, os métodos já citados neste item, limitam a escolha de resistências corriqueiramente empregadas em obras correntes, quer sendo pelo emprego de CAA de alta resistência (método de Gomes) ou por especificá-la como um parâmetro secundário (Método de Okamura, Método de Sedran e o Método do CBI) sendo geralmente aplicado um teor de cimento acima do necessário para atender as exigências de grandes quantidades de finos. Como a relação água/aglomerante do CAA é baixa e limitada, principalmente, pela necessidade da elevada resistência à segregação, as resistências atingidas geralmente são elevadas e este quesito será atingido sem grandes preocupações. Entretanto, estes métodos apresentam limitações quanto à otimização do proporcionamento dos materiais.

Alguns métodos se utilizam de ensaios com reômetros, para a análise das propriedades reológicas das misturas, os quais fornecem resultados relevantes para a dosagem do CAA. Porém, são equipamentos de alto custo, de acesso razoável e livres de padronização.

Ensaio simples e de fácil execução como cone de Marsh, Funil-V e Mini *slump flow* promovem grandes correlações com os parâmetros reológicos que se utilizam de ensaios mais rebuscados como os reômetros, por exemplo.

Nota-se também que não existem tantos métodos de dosagem que se reporte ao aditivo promotor de viscosidade. Aditivo este que pode ser destacado por propiciar maior estabilidade à mistura do CAA, evitando a ocorrência de segregação. Este material possui grande disponibilidade e fácil acesso em qualquer localidade.

Desse modo, cabe investigar estratégias de dosagem mais práticas para maior disseminação do CAA. Confirmando essa prerrogativa o método Repette-Melo preconiza dosagens mais práticas e econômicas, em que se tem como parâmetro de entrada a resistência a compressão. Nessa linha, buscou-se através deste trabalho a implementação do método Repette-Melo, visando um maior detalhamento do seu funcionamento para racionalizá-lo estando baseado na análise e investigação do comportamento de argamassas e suas correlações com os CAAs, bem como a otimização dos teores dos seus constituintes.

Procurou-se, desse modo, investigar este APV, quanto ao seu desempenho, atuação e comportamento em concretos, a partir de um estudo fatorial em argamassas com intuito de estabelecer faixas limites dos materiais componentes dos traços e seus teores otimizados, como também verificar a viabilidade de substituição do filer pelo APV na mistura.

Propõe-se atingir resistências usuais entre 20 e 45 MPa com a finalidade de se sugerir um CAA de baixo custo, para seu emprego em obras correntes.

Com base no que foi mencionado, este estudo visou investigar o comportamento das argamassas de forma que a seleção das misturas fosse mais racional para a confecção de CAA, com vistas em aprimorar o método Repette-Melo procurando-se ampliar o seu escopo para o emprego de APV.

2.12.10 Faixas de proporção dos materiais propostas na literatura

A EFNARC publicou em 2002 e 2005, documentos de diretrizes e especificações para o CAA, que foram preparadas por um grupo de projeto formado por 5 federações europeias dedicadas a promoção e divulgação de novos materiais e sistemas para a provisão e emprego do concreto. Nestas diretrizes, encontram-se também recomendações de proporcionamentos para a produção do CAA.

Os critérios de dosagem adotados para o CAA ainda não são amplamente difundidos, de forma que um ponto de partida é a experiência adquirida em trabalhos publicados (MELO, 2005). A Tabela 3 apresenta as definições de diversos autores quanto às faixas de proporcionamento dos materiais.

Tabela 3 - Faixas de proporção dos materiais para CAA propostas na literatura

	Cimento	Água/finos	Finos	Água	Agregado graúdo	Agregado miúdo
Okamura (1997)	-	0,90 – 1,00 (em volume)	-	-	50% do volume de sólidos	40% do volume de argamassa
Coppola (2001)	-	0,85 – 1,20 (em volume)	170 – 195 (L/m ³)	-	< 340 (L/m ³)	-
EFNARC (2002)	350 – 450 (kg/m ³)	0,80 – 1,10 (em volume)	160 – 240 (L/m ³) ou 400 – 600 (kg/m ³)	< 200 (L/m ³)	28 – 35% do volume de concreto	-
Gomes (2002)	200 – 400 (kg/m ³)	-	400 – 650 (kg/m ³)	150 – 180 (kg/m ³)	30 – 35% do vol. de concreto ou 750 – 920 (kg/m ³)	40 – 50% do vol. de argamassa ou 710 – 900 (kg/m ³)
EFNARC (2005)	350 – 450 (kg/m ³)	0,85 – 1,10 (em volume)	380 – 600 (kg/m ³)	150 - 210 (L/m ³)	27 – 36% do volume de concreto	-
Repette (2005)	350 – 450 (kg/m ³)	0,80 – 1,10 (em volume)	150 – 250 (L/m ³)	-	25 – 35% do volume de concreto	35 - 50% do vol. de argamassa
Domone (2005)	-	0,28 – 0,42 (em massa)	445 – 605 (kg/m ³)	-	29,1– 34,8% do vol. de concreto ou 770 – 925 (kg/m ³)	41 - 52% do vol. de argamassa

3 MATERIAIS E METODOLOGIA

Neste trabalho, propôs-se o desenvolvimento de concretos auto-adensáveis, reportando-se ao método de Repette-Melo, visando sua otimização e racionalização, através de um estudo experimental fatorial preliminar em argamassas auto-adensáveis. Nas misturas foram empregados separadamente dois promovedores de viscosidade de diferentes modos de atuação, sendo eles: filer calcário e aditivo promotor de viscosidade. A partir disso, foram produzidos e avaliados o comportamento e as propriedades do CAA no estado fresco e endurecido, buscando-se resistências usuais entre 20 e 45 MPa. Este trabalho vem a contribuir para o aperfeiçoamento do método de dosagem racional a fim de promover sua aplicação e desenvolvimento na região. Para tanto, dispõe-se das seguintes etapas:

- Seleção e caracterização dos materiais, averiguando a adequação e atendimento dos mesmos aos requisitos expressos na literatura, para a elaboração da pesquisa;
- Estudo com um programa fatorial de experimentos em argamassas, onde são avaliados vários componentes como o teor de agregado miúdo, teores de filer em substituição ao cimento, teores de aditivos superplastificante e promotor de viscosidade e relação água cimento;
- Indicação dos melhores teores encontrados dos materiais constituintes ensaiados para a produção do CAA.
- Análise e seleção das argamassas para produção dos respectivos concretos;
- Verificação do emprego do filer e do aditivo promotor de viscosidade nos traços e a substituição do filer pelo promotor de viscosidade;
- Otimização do método de dosagem utilizado, onde serão avaliados alguns parâmetros relevantes como os teores de filer em substituição ao cimento, aditivo superplastificante e relação a/c, com o intuito de permitir uma maior racionalização e viabilidade técnico-econômica desta técnica de dosagem;
- Investigação do aditivo promotor de viscosidade, sua eficiência, desempenho e emprego, nas argamassas e concretos auto-adensáveis, partindo-se de um estudo fatorial que poderá servir para a formulação de um método de dosagem que contempla o APV;

- Avaliação, comparação e análise das faixas propostas no método Repette-Melo para aceitação das argamassas como ponto de partida para a dosagem do CAA e estabelecer a otimização da mistura.

3.1 Seleção e Caracterização dos Materiais

Analizou-se inicialmente a disponibilidade dos materiais para o desenvolvimento do trabalho, a partir de materiais comumente usados, o que resultou em materiais originários da região da Grande Florianópolis, com exceção do filer calcário, oriundo do Paraná. Estes materiais foram caracterizados de acordo com os ensaios dispostos nas normas brasileiras.

Os materiais empregados na preparação das argamassas e dos concretos auto-adensáveis, seguem descritos:

3.1.1 Cimento

O cimento utilizado foi o Cimento Portland de Alta Resistência Inicial - Resistente a Sulfatos (CP V-ARI RS), da marca Votoran, o qual foi doado para elaboração da pesquisa. Este cimento possui grãos mais finos, e assim contribui para a maior fluidez da mistura. Suas características físico-químicas encontram-se na Tabela 4.

Tabela 4 - Características físicas e químicas do CPV-ARI RS da marca Votoran.

Análise física		Análise química		Análise mecânica	
Ensaio	Teor (%)	Ensaio	Teor (%)	Idade (dias)	Resistência (MPa)
# 0,075mm (%)	0,04	SiO ₂	23,73	1	23,62
# 0,0325mm (%)	0,80	Al ₂ O ₃	7,25		
Água de consistência normal (%)	29,85	Fe ₂ O ₃	3,34	3	33,18
		CaO	52,02		
Massa específica (g/cm ³)	2,99	MgO	5,50	7	37,61
Blaine (cm ² /g)	5125	SO ₃	2,95		
Início pega (h)	3:44	K ₂ O	1,17		
Fim pega (h)	4:44	Na ₂ O	0,17	28	48,04
Expansibilidade a quente (mm)	0,12	Perda fogo	3,22		
		Resíduo insolúvel	13,03		

3.1.2 Filer calcário

A adição empregada foi o filer calcário, de origem mineral, a fim de aumentar o teor de finos e promover uma maior viscosidade da mistura, proveniente do Estado do Paraná. Suas especificações, parte disponibilizadas pelo fornecedor, encontram-se na Tabela 5.

Tabela 5 - Características do filer calcário.

Análise física		Análise química	
Ensaio	Dados	Ensaio	Teor (%)
Umidade (%)	0,0 a 0,5	Fe ₂ O ₃	< 0,2
Massa específica (g/cm ³)	2,84	CaO	29,0 a 33,0
Superfície específica (cm ² /g)	145,68	MgO	18,5 a 23,5
% passante na # 0,075 mm	95	Perda fogo	41,4 a 47,0
Diâmetro máximo característico (mm)	0,3	Resíduo insolúvel em HCl	1,0 a 9,0

A massa específica do filer foi determinada pela NBR 6508/1984 e a superfície específica pela NBRNM 76/1998.

Utilizou-se o granulômetro a laser *Mastersizer 2000* para se determinar a curva granulométrica do cimento ARI RS e do filer calcário são mostradas na Figura 33 e a distribuição dos tamanhos das suas partículas seguem na Figura 34. Com isso se pôde verificar, claramente, que as partículas de cimento são mais finas que as de filer calcário.

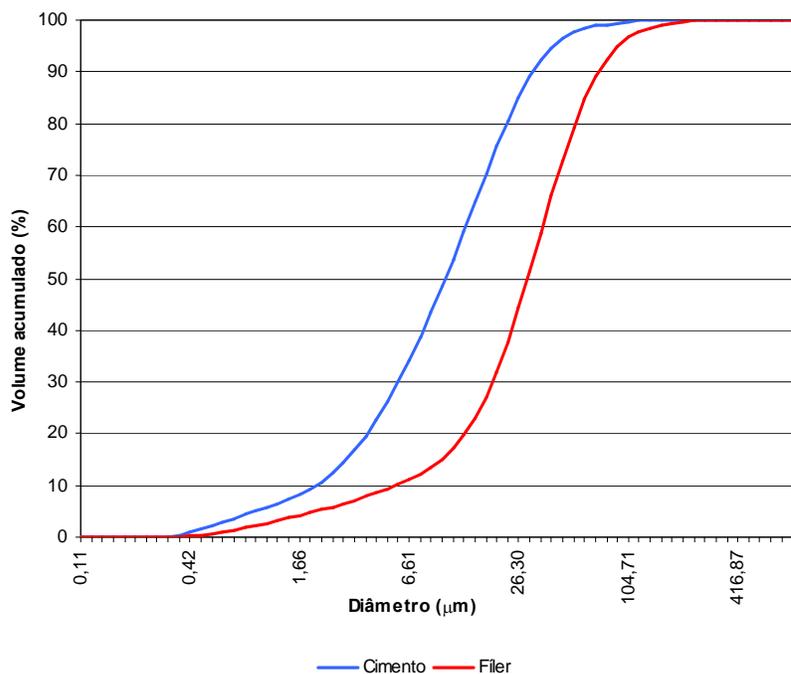


Figura 33 - Curva granulométrica do cimento e do filer.

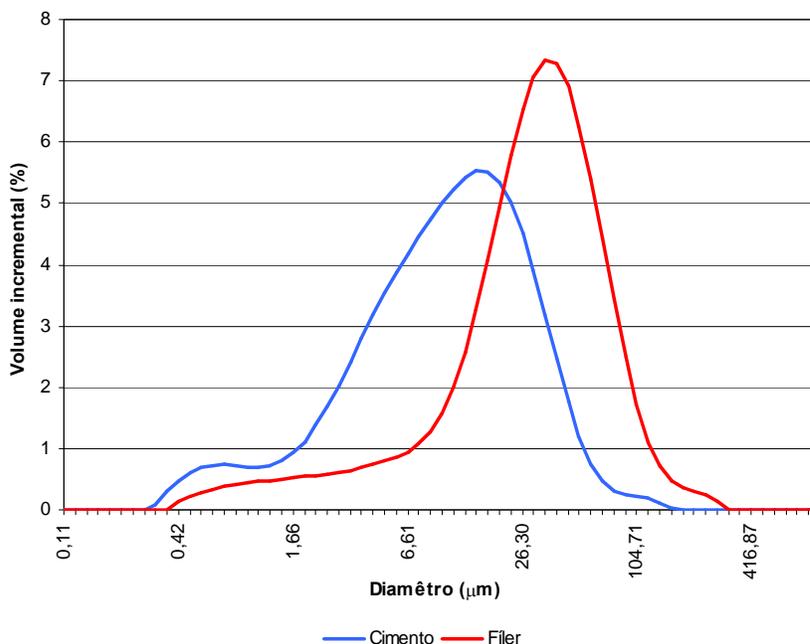


Figura 34 - Distribuição dos tamanhos das partículas de cimento e filler calcário.

3.1.3 Aditivos

Na confecção do CAA é indispensável o uso de aditivos, a fim de se obter as características reológicas desejadas. Deve-se empregar aditivo superplastificante para garantir maior fluidez pela redução da tensão de escoamento e, por vezes, aditivo promotor de viscosidade, para manter uma viscosidade adequada.

3.1.3.1 Superplastificante

Na composição de todas as argamassas e concretos aplicou-se o aditivo superplastificante constituído por uma solução aquosa de polímeros de éter policarboxílicos. O aditivo empregado foi o Glenium 51, da marca Degussa Construction Chemicals. Algumas características desses aditivos, fornecidas pelo fabricante, estão expressas na Tabela 6.

Tabela 6 - Características dos aditivos aplicados.

Aditivos	Superplastificante	Promotor de Viscosidade (VMA)
Teor de sólidos (%)	28,5 a 31,5	-
Densidade (g/cm ³)	1,067 a 1,107	1,000 a 1,075
Estado Físico	Líquido viscoso	Líquido viscoso
Cor	Bege	Transparente
Dosagem recomendada pelo fabricante	0,5435 a 1,087 % massa cimento ou 0,16 a 0,34 % teor sólidos	0,20 a 0,65 % massa de cimento

3.1.3.2 Promotor de Viscosidade

Uma importante propriedade do CAA é a de possuir uma viscosidade moderada e manter a estabilidade da mistura impedindo a ocorrência de segregação e de bloqueio. Com o objetivo de atender a essa propriedade, empregou-se o aditivo promotor de viscosidade (VMA) Rheomac 358, da marca Degussa. Tal aditivo é constituído por uma solução aquosa de polímeros de alta massa molecular denominado 2-Octyl-2-H-Isotiazol-3-ona, de acordo com o fabricante. Dispensou-se, nesta parte do estudo, a utilização de adições para se avaliar a eficiência do aditivo promotor de viscosidade com a presença do filer calcário.

3.1.4 Agregados

A caracterização destes materiais foi realizada de acordo com a prescrição de normas brasileiras como segue: a determinação da distribuição granulométrica (NBR NM 248:2003), material pulverulento (NBR NM 46:2003), massa específica (NBR 6508:1984), massa unitária no estado solto (NBR 7251:1982). A absorção do agregado miúdo foi determinada pela diferença da umidade total definida pela secagem da areia em estufa e a umidade superficial determinada pelo frasco de Chapman (NBR 9775:1987). Este método se mostra mais eficaz e preciso que o da norma NBR NM 30:2001, que apresenta uma caracterização visual da absorção. A Tabela 7 ilustra as características físicas dos agregados empregados. O agregado miúdo por apresentar uma absorção muito baixa (0,33 %), foi considerada desprezível.

3.1.4.1 Agregado miúdo

Utilizou-se na produção das argamassas uma areia média natural de rio, para que se atendesse aos parâmetros para a constituição de uma argamassa auto-adensável. E assim, fornecer à mistura uma quantidade de finos tais que promovesse a homogeneidade da mesma, assegurando fluidez e deformabilidade adequada. A umidade da areia era verificada antes da sua utilização e descontada da água da mistura. Sua curva granulométrica está apresentada na Figura 35.

3.1.4.2 Agregado graúdo

Para a confecção do concreto auto-adensável empregou-se o pedrisco, comercialmente conhecido como brita zero, agregado graúdo granítico de grãos pequenos e arredondados, conferindo curva granulométrica mostrada na Figura 35.

Tabela 7- Características dos agregados miúdo e graúdo.

Dados		Areia Média	Brita Zero
Granulometria (% Retida acumulada)	Abertura das peneiras (mm)	19,5	0
		12,5	0,00
		9,5	0,00
		6,3	0,00
		4,8	0,07
		2,4	0,99
		1,2	8,71
		0,6	33,79
		0,3	69,06
		0,15	88,37
		0,075	95,84
		Fundo	100,00
Diâmetro máximo característico (mm)		2,4	9,5
Diâmetro mínimo característico (mm)		< 0,075	< 1,2
Módulo de Finura		2,01	5,44
Massa específica (kg/dm ³)		2,62	2,67
Massa unitária no estado solto (kg/dm ³)		1,38	1,49
Material Pulverulento (%)		4,17	0,81
Absorção (%)		0,33	-

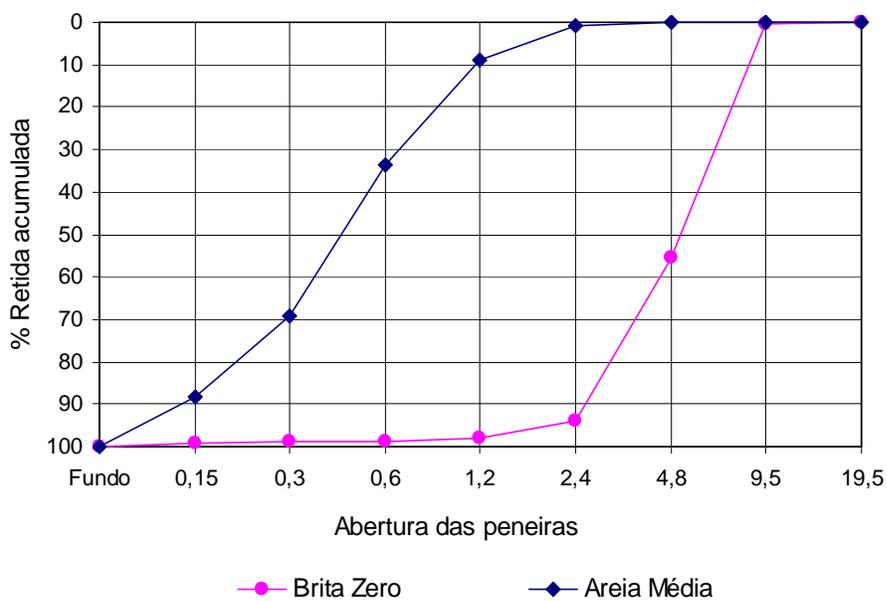


Figura 35 - Curvas granulométricas dos agregados

3.2 Ensaios Realizados em Argamassas

Antes da utilização de qualquer equipamento de ensaio, os mesmos eram umedecidos antes de serem usados.

Para os ensaios de espalhamento (*slump flow*) e funil-V foram utilizadas as faixas empregadas no método Repette-Melo, obedecendo aos mesmos critérios de Edamatsu et al. (1999), mostrados na Tabela 8. Okamura também propôs utilizar os índices Gm (diâmetro de espalhamento relativo) e Rm (tempo de escoamento relativo) para a aceitação das argamassas. Na Tabela 8, encontra-se alguns valores apresentados em trabalhos publicados sobre o CAA.

Tabela 8 - Limites de aceitação da argamassa auto-adensável encontrados na literatura, de acordo com o método de ensaio.

Trabalhos da literatura	Slump Flow (mm)	Funil-V (s)
Okamura (1997)	245	10
Edamatsu et al. (1999)	200 - 280	5 - 10
EFNARC (2002)	240 - 260	7 - 11
Ghezal (2003)	220 - 280	-
Ankoné (2000)*	265 - 315	9 - 10
BFBN (2001)*	305 - 325	7 - 9
Walraven et al. (1999)*	250	9 - 11

* (BROUWERS e RADIX, 2005)

3.2.1 Espalhamento (*Slump Flow*)

O espalhamento das argamassas foi avaliado pelo ensaio de espalhamento (*slump flow*), conforme Figura 36, através de um cone metálico, com diâmetros superior e inferior iguais a 70 e 10 mm respectivamente, e altura de 60 mm, como observado na Figura 36a. Para argamassas auto-adensáveis não há a necessidade de se realizar os 30 golpes indicados pela norma NBR 13276:2002 a mistura deve se deformar pela ação de seu peso próprio. O ensaio consiste na medição, com auxílio de um paquímetro, do diâmetro de abertura em duas direções perpendiculares entre si após seu espalhamento, como visto na Figura 36b. As argamassas caracterizadas como auto-adensáveis foram aquelas que apresentaram espalhamento entre 200 e 280 mm, em conformidade com os critérios do Método Repette-Melo (2005).



Figura 36 - Cone metálico (a) para ensaio de espalhamento (*slump flow*) em argamassa(b).

3.2.2 Fluidez (Funil-V)

Realizou-se o ensaio do funil-V, mostrado na Figura 37, nas argamassas, o qual fornece o tempo de escoamento da mistura, que está intimamente ligado com a viscosidade da mesma. Pode ser verificado também se uma mistura está muita, ou pouco fluida. Neste ensaio, mede-se o tempo de escoamento da argamassa, com auxílio de um cronômetro, desde o momento de retirada da portinhola até a verificação visual do primeiro sinal de término de escoamento (aparecimento do vão livre no fundo do funil). De acordo com o critério de Edamatsu (1999) as argamassas que obtêm tempo de escoamento entre 5 a 10 segundos podem ser consideradas auto-adensáveis.



Figura 37 - Funil-V para argamassas.

3.2.3 Massa Específica das Argamassas

A massa específica das argamassas foi obtida pelo processo gravimétrico, através de um molde metálico, de formato cilíndrico, como observado na Figura 38, e de volume conhecido (484 ml). Este era tarado numa balança de precisão 0,1 g e totalmente preenchido e pesado. Desta forma obtinha-se o peso da argamassa e conseqüentemente sua massa específica.



Figura 38 - Molde metálico cilíndrico de volume conhecido.

3.2.4 Teor de Ar Incorporado

Com a massa específica das argamassas, calculou-se o teor de ar incorporado ou teor de vazios de acordo com a NBR 13278:1995. O mesmo também foi determinado para os concretos executados.

3.2.5 Tempo de início do aumento de temperatura das argamassas

O tempo de início do aumento de temperatura liberada pela reação química da hidratação do cimento foi medida em um calorímetro semi-adiabático. O sistema consiste em uma caixa de material isolante (poliestireno expandido) com uma cavidade para 200 ml de argamassa. A temperatura da amostra e da vizinhança foi medida por um termopar tipo K conectado ao sistema de aquisição de dados do Agilent Benk Link, que registrava a temperatura em intervalos de 10 minutos. Depois de acondicionados os termopares no centro das amostras, eles eram imobilizados vedando-se com fita adesiva a parte superior da caixa. Finalmente a tampa da caixa era fixada à mesma para impedir as possíveis trocas de calor com o ambiente da sala climatizada, conforme Figura 39. Ainda assim, parte do calor foi dissipada para a vizinhança, o que não invalida o estudo comparativo entre as diversas

argamassas e seus diferentes teores como também a comparação das argamassas testadas com filer e as com aditivo promotor de viscosidade sobre o tempo para que se tenha início a reação química da hidratação do cimento.

Em estudo feito por Juvas et al (2001) com a utilização de calorímetro semi-adiabático, com a análise dos gráficos foi constatado que o aspecto mais interessante do comportamento da reação é a taxa de liberação de calor, o qual pode ser chamado de “impressão digital” do cimento. As mais complicadas interações químicas entre o cimento e aditivo podem ser visualizadas na curva, e o método mostra-se muito sensível a mudanças na qualidade do cimento, assim como na relação a/c e aditivos. Parece existir uma situação especial com misturas com superplastificantes onde a compatibilidade do superplastificante e o cimento pode causar problemas ou de alguma forma, diferenças na trabalhabilidade com as variações das misturas.

Esta constatação torna-se interessante à medida que as propriedades físicas e químicas do cimento, rotineiramente caracterizadas, nem sempre são suficientes para explicar as variações ocorridas no concreto fresco ou nas primeiras idades, principalmente quando do uso do aditivo. No entanto, a comparação entre os dados é recomendada apenas com os dados obtidos com esse calorímetro específico, uma vez que este procedimento não é normalizado sendo que a repetibilidade poderá ficar comprometida.

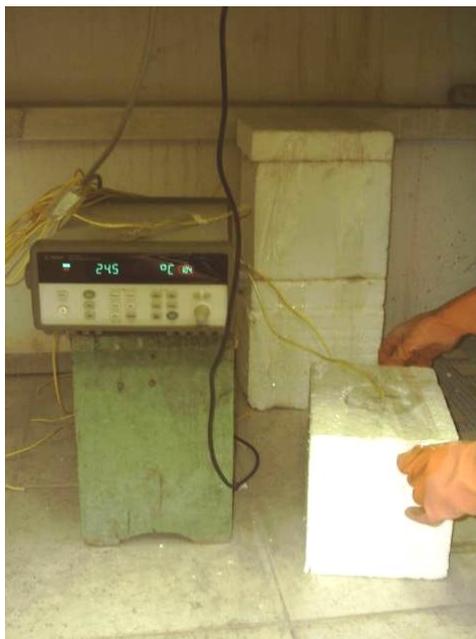


Figura 39 - Ensaio para a determinação do tempo de pega das argamassas

3.2.6 Resistência à compressão

Em argamassa, foram moldados quatro corpos-de-prova em moldes cilíndricos metálicos de 5 cm de diâmetro por 10 cm de altura para cada mistura, sem vibração, com o intuito de verificar a resistência à compressão aos 7 e 28 dias das argamassas auto-adensáveis desenvolvidas. Estes permaneciam durante um dia em sala climatizada e cobertos devidamente, por uma placa de vidro, a fim de evitar a ocorrência de evaporação da água de constituição. Na seqüência, desmoldavam-se os 4 corpos-de-prova e estes eram identificados e submetidos à cura úmida por imersão em água saturada em cal até completarem as idades estabelecidas para serem rompidos na prensa da marca Shimadzu, conforme procedimentos descritos na NBR 7215:1996.

Todos os corpos-de-prova de argamassas e concretos foram observados visualmente, para verificar o aspecto da superfície acabada, sua porosidade superficial e indícios de segregação.

3.3 Confeção das Argamassas Auto-Adensáveis

Com o objetivo de atender as características e propriedades do CAA da forma mais econômica, foi realizado um estudo que visa avaliar diversas dosagens de argamassas auto-adensáveis buscando-se, desse modo, suas correlações com os concretos auto-adensáveis através do estudo de análise fatorial, ou multivariada. Este estudo permite verificar o comportamento de uma variável ou grupos de variáveis em covariação com outras, para que sejam descobertas suas regularidades comportamentais. Esta pesquisa iniciou-se com o estudo em argamassas onde são avaliadas várias dosagens previamente, variando-se os teores de areia, cimento, finos (em substituição ao cimento, em volume), aditivos superplastificantes e dois promotores de viscosidade (separadamente) para atingir resistências à compressão entre 20 e 45 MPa.

Busca-se otimizar os teores dos materiais empregados na região da grande Florianópolis para a confecção do CAA, e com isso propiciar a racionalização do método de dosagem Repette-Melo para a produção do concreto auto-adensável com fíler, que se baseia na dosagem em argamassas como critério de dosagem. E ainda a investigação do desempenho e a proposição de uma diretriz de dosagem contemplando o APV.

No presente trabalho, ensaiou-se teores de areia que se enquadram na faixa mais utilizada nas dosagens vigentes. Estudos mais recentes mostram que o teor de 40 % de areia

na argamassa, proposto por Okamura (1999), mostra-se conservador, frente às dosagens subseqüentes a esta data, no âmbito de desenvolvimento do CAA (DOMONE, 2005). Teores de areia foram levantados por Domone (2005), que apresentou uma faixa do volume de agregado miúdo variando entre 41 a 52 % para os 80 % dos 68 casos relatados em dosagens compiladas por ele, num período entre 1993 e 2003. Nestes termos, este estudo adotou três teores de agregado miúdo equivalentes a 40, 45 e 50 % do volume de argamassa.

Para tanto, foram experimentadas várias dosagens de misturas de argamassas com diferentes teores de materiais constituintes, devendo ser escolhida a relação a/c mais econômica em função do intervalo de resistência à compressão e de cada teor de aditivo empregado. Em consequência desses parâmetros de dosagem adotados é possível evitar a produção de misturas nas quais são atingidas elevadas resistências não intencionais, muito comum na maioria das dosagens de CAA.

Após a seleção da resistência das argamassas pode ser utilizada a Lei de Abrams adaptada para o CAA (definida por um procedimento experimental) apresentada na Equação 7. Esta expressão é dada em função da resistência à compressão aos 28 dias, e refere-se ao cimento CP V ARI RS (MELO, 2005).

$$a/c = 1,17 \cdot \log\left(\frac{125,28}{f_{c28}}\right) \quad (7)$$

As dosagens em misturas de argamassas com filer foram ensaiadas com: três teores de agregado miúdo na argamassa (40, 45 e 50% em volume), e para cada teor desses, utilizou-se cinco teores de cimento (100, 75, 65, 55 e 45%) e cinco teores de finos – filer calcário (substituição em volume ao cimento em 0, 25, 35, 45 e 55 %) para avaliar a influência do teor de filer calcário da mistura na resistência à compressão, pois se espera que ele não promova alterações significativas nas propriedades mecânicas do concreto. Para cada proporção de cimento, cinco teores de aditivo superplastificante de base policarboxilato (0,10; 0,15; 0,20; 0,25 e 0,30 % da massa de cimento em teor de sólidos) foram empregados, sendo que para cada teor de aditivo existe uma faixa de nove relações água/cimento (0,45; 0,50; 0,55; 0,60; 0,65; 0,70; 0,75; 0,80 e 0,85). A Tabela 9 e a Figura 40 esquematizam esta primeira parte da pesquisa como a série com adição de filer.

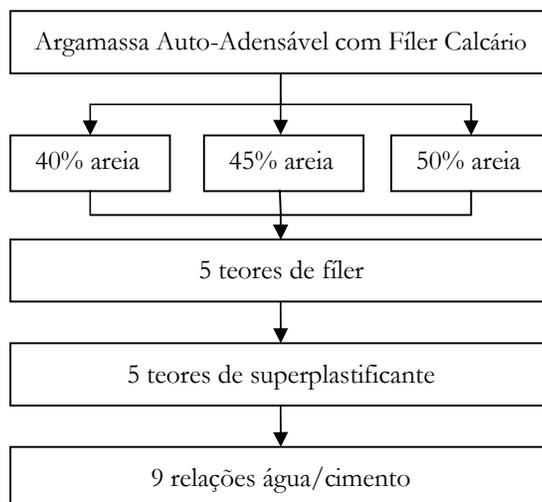


Figura 40 - Fluxograma das argamassas auto-adensáveis com filer

Tabela 9 - Proporcionamentos das misturas com filer.

Teores dos Materiais																				
40% Areia média																				
45% Areia média																				
50% Areia média																				
Relações a/c	100 % Cimento	0 % Filer	0,10; 0,15; 0,20; 0,25; 0,30% Superpl.	0,45	75 % Cimento	25 % Filer	0,10; 0,15; 0,20; 0,25; 0,30% Superpl.	0,45	65 % Cimento	35 % Filer	0,10; 0,15; 0,20; 0,25; 0,30% Superpl.	0,45	55 % Cimento	45 % Filer	0,10; 0,15; 0,20; 0,25; 0,30% Superpl.	0,45	45 % Cimento	55 % Filer	0,10; 0,15; 0,20; 0,25; 0,30% Superpl.	0,45
				0,50				0,50				0,50				0,50				
				0,55				0,55				0,55				0,55				
				0,60				0,60				0,60				0,60				
				0,65				0,65				0,65				0,65				
				0,70				0,70				0,70				0,70				
				0,75				0,75				0,75				0,75				
				0,80				0,80				0,80				0,80				
				0,85				0,85				0,85				0,85				

Na segunda parte da pesquisa estudou-se a influência Aditivo Promotor de Viscosidade (APV), sendo feitas duas séries, uma com 100% do cimento e a outra com o cimento variando conforme os teores utilizados nas séries com filer, no entanto, sem a sua aplicação, sendo este substituído pelos teores de APV. A série com 100 % de cimento, como mostra a 0 e a Figura 41, foi analisada com um teor de areia equivalente a 50 %, e 5 teores de aditivo superplastificante de base policarboxilato (0,10; 0,15; 0,20; 0,25 e 0,30 % de teor de sólidos em relação à massa de cimento) e para cada um destes teores é estabelecida uma faixa com nove relações água/cimento (0,45; 0,50; 0,55; 0,60; 0,65; 0,70; 0,75; 0,80 e 0,85). Para cada grupo destes, aplica-se cinco teores de promotor de viscosidade (0,2; 0,3; 0,4; 0,5 e 0,6 %). Desse modo, são definidos os teores de materiais a serem variados respeitando-se as

recomendações dos fabricantes do APV, onde a dosagem varia de 0,1 a 0,6%, e teor mínimo de 50 % para o agregado miúdo.

Tabela 10 - Proporcionamentos das misturas com aditivo promotor de viscosidade.

Teores dos Materiais															
50% Areia média															
Relações a/c	100 % Cimento	0,2% Aditivo Promotor de Viscosidade 0,10; 0,15; 0,20; 0,25; 0,30% Superpl.	0,45	100 % Cimento	0,3% Aditivo Promotor de Viscosidade 0,10; 0,15; 0,20; 0,25; 0,30% Superpl.	0,45	100 % Cimento	0,4% Aditivo Promotor de Viscosidade 0,10; 0,15; 0,20; 0,25; 0,30% Superpl.	0,45	100 % Cimento	0,5% Aditivo Promotor de Viscosidade 0,10; 0,15; 0,20; 0,25; 0,30% Superpl.	0,45	100 % Cimento	0,6% Aditivo Promotor de Viscosidade 0,10; 0,15; 0,20; 0,25; 0,30% Superpl.	0,45
			0,50			0,50			0,50			0,50			
			0,55			0,55			0,55			0,55			
			0,60			0,60			0,60			0,60			
			0,65			0,65			0,65			0,65			
			0,70			0,70			0,70			0,70			
			0,75			0,75			0,75			0,75			
			0,80			0,80			0,80			0,80			
			0,85			0,85			0,85			0,85			

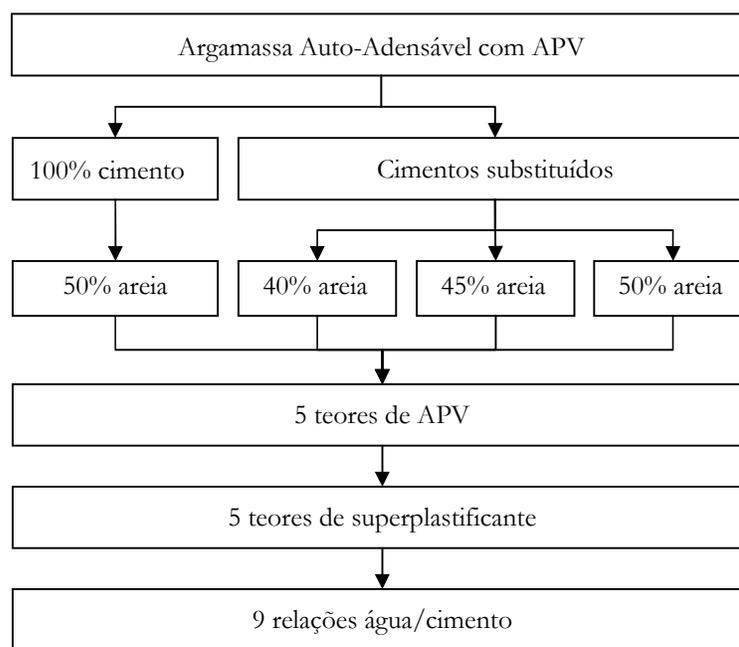


Figura 41 - Fluxograma das argamassas auto-adensáveis com APV.

Ainda no estudo com APV, são ensaiadas argamassas variando-se os teores de aditivo promotor de viscosidade em substituição ao filer, conforme esquematização na Figura 41 e Tabela 11, ou seja, retira-se o filer da série anteriormente descrita e ensaiam-se as argamassas com os cinco teores de APV, para verificar qual o teor equivalente deste aditivo substituirá o

teor de filer. Para isto são usados três teores de agregado miúdo na argamassa (40, 45 e 50% em volume) E o procedimento anteriormente descrito é repetido da mesma forma, deste ponto em diante, aplicando-se cinco teores de aditivo superplastificante de base policarboxilato (0,10; 0,15; 0,20; 0,25 e 0,30 %) sendo que para cada teor é estabelecida uma faixa com nove relações água/cimento (0,45; 0,50; 0,55; 0,60; 0,65; 0,70; 0,75; 0,80 e 0,85). E para cada grupo destes, foram usados cinco teores de aditivo promotor de viscosidade.

Tabela 11- Proporcionamentos das misturas com aditivo promotor de viscosidade em substituição ao filer.

Teores dos Materiais														
40% Areia média														
45% Areia média														
50% Areia média														
Relações a/c	75 % Cimento 0,20; 0,30; 0,40; 0,50; 0,60 Prom. Viscosidade	0,10; 0,15; 0,20; 0,25; 0,30% Superpl.	0,45	65 % Cimento 0,20; 0,30; 0,40; 0,50; 0,60 Prom. Viscosidade	0,10; 0,15; 0,20; 0,25; 0,30% Superpl.	0,45	55 % Cimento 0,20; 0,30; 0,40; 0,50; 0,60 Prom. Viscosidade	0,10; 0,15; 0,20; 0,25; 0,30% Superpl.	0,45	45 % Cimento 0,20; 0,30; 0,40; 0,50; 0,60 Prom. Viscosidade	0,10; 0,15; 0,20; 0,25; 0,30% Superpl.	0,45	0,10; 0,15; 0,20; 0,25; 0,30% Superpl.	0,45
			0,50			0,50			0,50			0,50		
			0,55			0,55			0,55			0,55		
			0,60			0,60			0,60			0,60		
			0,65			0,65			0,65			0,65		
			0,70			0,70			0,70			0,70		
			0,75			0,75			0,75			0,75		
			0,80			0,80			0,80			0,80		
			0,85			0,85			0,85			0,85		

Por fim estes teores são combinados entre si, de modo a fornecer séries de argamassas, com filer ou com aditivo promotor de viscosidade, e assim ser verificado comparativamente o desempenho das argamassas, tanto no estado fresco, quanto no endurecido. O que resulta numa combinação de muitos traços (4.275), sendo escolhido o traço mais econômico para cada combinação relação água/cimento e teor de superplastificante, reduzindo bastante à quantidade de traços. Mas há a possibilidade de esse número ser ainda mais reduzido, isto porque nem todas as misturas atendem os requisitos de uma argamassa auto-adensável e, às vezes, ocorrem casos em que para um teor de SP nenhuma mistura conseguiu cumprir os requisitos de ensaio. Na Figura 42 são apresentados os critérios de análise dos parâmetros de conformidade das argamassas no estado fresco e seus respectivos ensaios através do espalhamento (*slump flow*), numa faixa de abertura delimitada pelo método Repette-Melo entre 200 e 280 mm, e tempo de escoamento (funil-V).

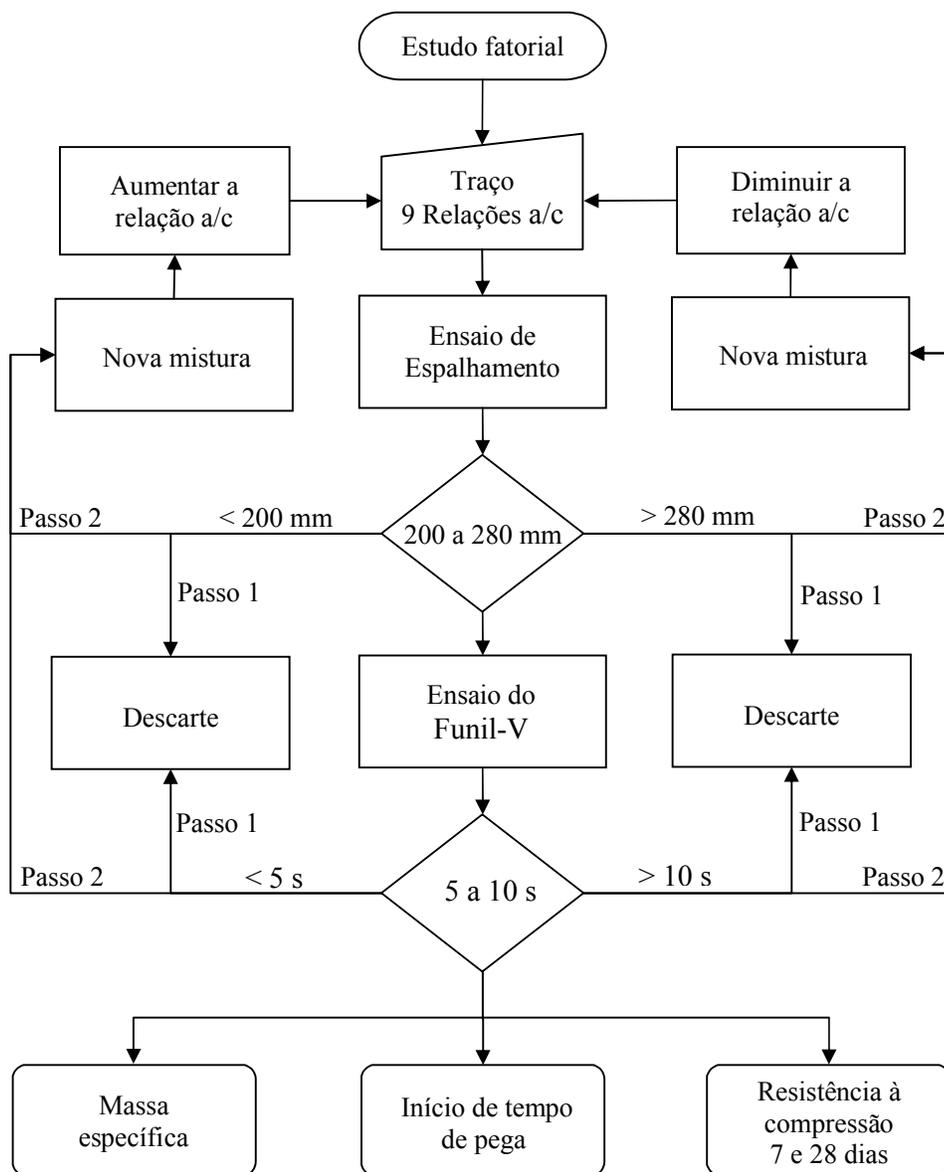


Figura 42 - Critério de análise dos parâmetros de conformidade das argamassas e seus ensaios.

Partiu-se da escolha de uma relação a/c para a confecção das misturas, para um determinado teor de superplastificante e filler (ou APV, quando para esta série) e seu respectivo conteúdo de areia. Após a mistura realizavam-se os ensaios de espalhamento e funil-V para verificação da conformidade. Se para qualquer um destes ensaios de argamassa não fosse atendido os requisitos de auto-compactabilidade, a mesma era descartada e escolhia-se outro traço, conforme Figura 36, baseado nestes resultados, para se encontrar a mistura auto-adensável com a menor relação a/c possível. Porém, não foram consideradas tolerâncias em virtude das faixas limites já serem bastante amplas. Ainda assim, foram realizados ensaios de variabilidade para uma dada argamassa, com cinco repetições, que

resultaram numa variação de 20 mm para o espalhamento e 1 segundo para o tempo de escoamento do Funil-V.

Além disso, em muitos casos já se tinha uma previsão da relação a/c a ser testada, com base na composição dos materiais ou na experiência adquirida na execução dos ensaios. Para as demais misturas da mesma seqüência de determinado teor de filer ou na seqüência com determinado teor de aditivo superplastificante, inferia-se com maior precisão a escolha de determinado traço dentre as nove relações água/cimento à medida que se aumentava o teor de superplastificante (0,1 a 0,3 % do teor de sólidos sobre a massa de cimento). Por exemplo: para um determinado traço com um teor de filer elevado e um teor de areia elevado, iniciava-se o experimento com uma relação a/c mais elevada. O contrário acontecia para um baixo teor de filer em substituição ao cimento e o menor teor de areia (40 % do volume) quando se iniciava o ensaio com uma a relação a/c mais baixa.

A substituição do filer pelo aditivo promotor só foi possível para as composições com o maior teor de areia (no caso 50 % do volume), e com teores baixos de substituição, praticamente só para 75 % de cimento, onde 25 % do filer foi retirado da mistura e ensaiado com teores de APV, para se verificar sua atuação e desempenho comparado ao do filer. Todos os demais traços dos conteúdos de filer remanescentes desta série e os demais teores de areia não resultaram em argamassas que se enquadraram nos critérios de auto-adensabilidade, salvo algumas pouquíssimas misturas. A possibilidade de não ter presente na mistura quantidade suficiente de finos, para teores menores de areia e/ou cimento, ainda que se tenha a formação da rede entrelaçada do aditivo APV, faltam partículas para viabilizar sua ação de aumentar a viscosidade da mistura.

Com base no que foi dito selecionaram-se os traços mais econômicos, ou seja, com a menor relação água/cimento possível, para a obtenção de resistência à compressão mais elevada. E que atendessem, também, os requisitos estabelecidos no estado fresco através dos ensaios de espalhamento (*slump flow*) e Funil-V, no estado endurecido a resistência à compressão.

3.3.1 Definição dos parâmetros experimentais de mistura de argamassas

Umidade da areia

Primeiramente, ensaiaram-se várias metodologias para a confecção das argamassas em análise, para validar a mais eficiente e os que não influenciassem nos resultados. A partir de um determinado traço com 40 % de areia, 75 % de cimento, 25 % de filer, 0,15 % de aditivo

superplastificante e a/c de 0,55 determinaram-se a influência da aplicação de areia seca e de areia úmida. Os resultados mostraram-se bastante distintos, na Tabela 12.

Tabela 12 - Traço testado com areia úmida e areia seca.

Traço testado	Com areia úmida	Com areia seca
Espalhamento (mm)	272,02	356,33
Funil-V (s)	6,78	2,44

Com base nesses resultados, analisados repetidamente e confirmados, notou-se que a mistura constituída com areia úmida apresentou-se dentro da faixa de aceitação dos ensaios de espalhamento e funil-V, conforme visto na Tabela 12. Já a mistura utilizando areia seca forneceu valores bastante distantes da faixa aceitável, uma disparidade muito elevada em relação à primeira. Esse comportamento pode ser explicado, pelo fato das partículas de areia estarem totalmente secas e estas, por sua vez, não disporem de tempo hábil suficiente para que a água fosse absorvida pelos grãos. Assim, permanece mais água livre na mistura, aumentando seu espalhamento, sua fluidez e seu tempo de escoamento.

Aarre e Domone (2003) também constataram que o espalhamento inicial foi maior para uma mistura de CAA com agregados secos do que para outra com agregados úmidos, e atribuíram essa diferença ao tempo necessário para os agregados absorverem a água.

Dessa forma optou-se pelo uso de areia úmida que além de fornecer os melhores resultados, encontra-se geralmente nesta condição na natureza e é a que mais se assemelha com uma aplicação prática e real. Assim, para a confecção das misturas com a areia úmida, deve-se verificar a umidade que se encontra a areia poucos momentos antes do seu emprego e descontá-la da água total da mistura.

Procedimento de Mistura

O método empregado para a produção das argamassas, por ser o menos sujeito a variações, foi o método de produção de novas misturas sem acréscimo de frações. Tendo em vista que com a dosagem com acréscimo de frações, a relação a/c ficou superestimada, uma vez que a repetição do seu resultado final levou a valores de ensaios além dos requisitos pré-estabelecido. Desse modo, foi escolhido o procedimento de fazer novas misturas, o qual atendeu os requisitos preestabelecidos, neste caso com a/c menor, resultando numa argamassa mais econômica, conforme pode ser verificado na Tabela 13.

Tabela 13 - Traço testado com areia úmida, sem e com frações de acréscimos.

Traço testado	Sem acréscimo de frações	Com acréscimo de frações*	Nova mistura
Espalhamento (mm)	224,90	340,0	259,6
Funil-V (s)	6,00	3,01	7,44
Relação a/c	0,55	0,55	0,50

* Repetição do resultado final encontrado da argamassa com acréscimo de frações.

As misturas dos materiais foram produzidas em argamassadeira mecânica de eixo planetário, cujas velocidades de rotação para a pá foram de 140 rpm e 285 rpm, e para o planetário de 62 rpm e 125 rpm, localizada em sala climatizada com controle de temperatura ($21^{\circ}\text{C} \pm 2^{\circ}\text{C}$) e umidade relativa em torno de 70 %.

Produziu-se um volume em torno de 1300 ml para cada traço.

A seqüência de mistura foi:

- Mistura do cimento com a água em velocidade lenta por 30 segundos;
- Adição de toda a areia durante os 30 segundos seguintes em velocidade lenta;
- Homogeneização da mistura durante 30 segundos em velocidade rápida;
- Repouso da argamassa durante 3 minutos e 30 segundos, sendo a mesma coberta com pano úmido;
- Adição do aditivo superplastificante, por meio de seringa, e mistura em velocidade rápida durante 1 minuto;
- Repouso da mistura durante 1 minuto, coberta com pano úmido;
- Adição do aditivo promotor de viscosidade, por meio de seringa, e mistura em velocidade rápida durante 1 minuto.

A areia era adicionada úmida, porém sua umidade era descontada da água total de cada traço.

3.4 Confeção dos Concretos Auto-Adensáveis

Para a confeção dos concretos, inicialmente, experimentou-se utilizar o misturador tipo betoneira intermitente, de eixo inclinado e pás contínuas solidárias a cuba, com capacidade de 120 l, e velocidade de 29 rpm. Mas, por não possuir energia de mistura adequada para a produção do CAA, optou-se em utilizar outro misturador.

Dessa forma, confeccionou-se, para cada mistura, 20 litros de concreto, sendo a homogeneização feita em betoneira intermitente de queda livre de eixo inclinado e pás contínuas solidárias à cuba, com capacidade de 350 l, conforme pode ser visto na Figura 43, com isso, conseguiu-se uma melhor energia de mistura, a qual influência nos resultados

esperados. Os CAAs foram confeccionados no interior do Laboratório de Materiais da Construção Civil, a UFSC – LMCC, a uma temperatura ambiente de $23 \pm 2^\circ\text{C}$.



Figura 43 - Misturador escolhido para a confecção dos concretos.

O critério para a seleção dos traços das argamassas para a produção dos CAAs levou em conta alguns parâmetros importantes como a resistência, a influencia das várias relações água/cimento, o teor de aditivo. Desse modo, foram selecionadas 16 dosagens diferentes de argamassas para a confecção dos concretos auto-adensáveis.

O teor de agregado foi definido previamente de forma experimental. O teor ideal para os três teores de areia utilizados em argamassa foi o de 28 % de agregado graúdo (dentre outros de teores mais elevados previamente testados), o qual se encaixou nos teores indicados pela EFNARC, 2005 e atendeu todos os requisitos pré-estabelecidos através dos ensaios de espalhamento (*slump flow*), o tempo de escoamento (Funil-V) e ainda se mostrou o mais adequado através da análise visual. (para detecção qualitativa da segregação e porosidade superficial).

Vale ressaltar que um ajuste inicial de no mínimo 0,05 % no teor do aditivo superplastificante para a confecção dos CAAs fez-se necessário, pois o teor advindo da argamassa não corresponde diretamente ao mesmo da dosagem do concreto. Os efeitos da dosagem inicial foram averiguados no momento de sua incorporação, através da análise visual da mistura durante a produção do CAA.

A betoneira foi imprimada com uma dosagem igual a do concreto antes de sua confecção.

O procedimento de mistura dos materiais na betoneira está descrito a seguir:

- Colocação do pedrisco com 80 % da água durante 1 minuto;
- Adição do cimento e 15 % da água por 1 minuto e 30 segundos;
- Colocação da areia e homogeneização por 1 minuto e 30 segundos;
- Repouso do concreto durante 3 minutos para a retirada de material aderido às pás da betoneira;
- Homogeneização da mistura durante 2 minutos;
- Adição do aditivo superplastificante com parte da água restante (para o enxágüe do copo dosador) e mistura por 5 minutos;
- Incorporação do aditivo promotor de viscosidade mais o restante da água e mistura durante 3 minutos.

3.4.1 Ensaios Utilizados em CAA

Nos concretos auto-adensáveis são realizados quatro ensaios que avaliam os requisitos no estado fresco, para o atendimento das conformidades de suas propriedades de auto-adensibilidade, e no estado endurecido, de acordo com a Figura 44.

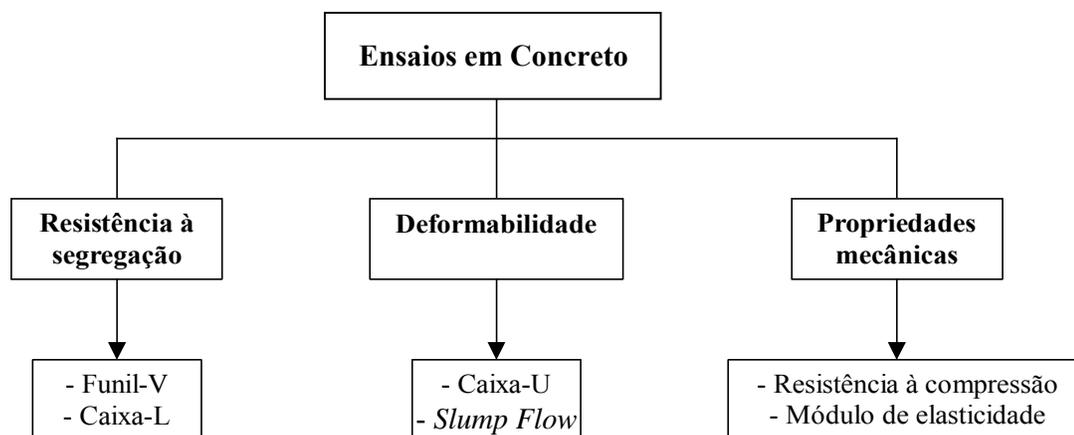


Figura 44 - Parâmetros verificados no concreto auto-adensável.

Seguem descritos todos os ensaios empregados nesse estudo para a avaliação do CAA.

3.4.1.1 Espalhamento (Slump flow)

Para o ensaio de espalhamento do CAA, o diâmetro médio recomendado pela EFNARC 2005 e pela literatura em geral é de 600 a 700 mm de espalhamento, medido com uma trena métrica, como o indicado na Figura 45b. Neste ensaio se utiliza o cone de Abrams, como mostra a Figura 45a, de diâmetros superior e inferior, iguais a 100 e 200 mm,

respectivamente, e altura de 300 mm. O cone foi preenchido e suspenso, para constatar a deformabilidade do CAA sob ação do seu peso próprio.

Para os concretos não-conformes, além do ajuste de superplastificante inicial sofrido, de 0,05 %, fez-se necessário a adição de pequenos ajustes de 0,025 % por vez, incorrendo na homogeneização da mistura por mais 3 minutos, até atendimento de todos os parâmetros determinados nos ensaios para o CAA.

3.4.1.2 Tempo de escoamento (Funil-V)

Realizou-se nos concretos o ensaio do funil-V, conforme pode ser observado na Figura 46, que nos fornece o tempo de escoamento da mistura. Neste ensaio o funil de seções retangulares é preenchido com concreto e avalia-se a capacidade da mistura em passar por seções estreitas. Então, mede-se o tempo de escoamento da mistura, obedecendo as recomendações da literatura (EFNARC, 2005) de tempo inferior ou igual a 8 segundos.



Figura 45 - Ensaio de espalhamento para o CAA.



Figura 46 - Funil-V de concreto com vistas superior, frontal e lateral.

3.4.1.3 Capacidade de preenchimento e resistência ao bloqueio (caixa-L e caixa-U)

Estes dois ensaios foram realizados em concreto. A caixa-L determina principalmente a capacidade que o CAA tem de passar por restrições. Preenche-se a parte vertical da caixa-L com o CAA e libera-se a passagem do material para a parte horizontal após seu escoamento pelas barras verticais como observado na Figura 47. Assim, faz-se a verificação a partir da razão entre as alturas horizontal (h_2) do concreto na caixa, que fica na extremidade desta direção e a vertical (h_1), que é medida antes da grade na parte vertical da caixa. Esta relação deve ser maior que 0,80 atendendo a recomendação da EFNARC, 2005.

A caixa-U, observada na Figura 47, mede a deformabilidade do CAA. Esta possui dois compartimentos, onde o maior é preenchido com concreto, que deve atravessar os obstáculos similares a barras de ferro. Quando levantada a portinhola o concreto escoo e então é medida a altura atingida pelo mesmo no outro lado da caixa, a qual deve ser maior que 300 mm.



Figura 47 - Caixa-U e caixa-L.

3.4.1.4 Massa Específica dos Concretos

As massas específicas dos concretos foram obtidas através de um molde metálico cilíndrico padronizado, de moldagem de concreto, de acordo com a Figura 48, de 10 cm de base e 20 cm de altura, com volume igual a 1570,8 ml, que era totalmente preenchido e pesado. Assim, obteve-se o peso do CAA e calculou sua massa específica.

3.4.1.5 Resistência à compressão

Tanto argamassas como para os CAAs tiveram moldados dois corpos-de-prova para cada mistura, para serem levados à ruptura por compressão aos 28 dias, regidos pela NBR 7215:1996. Para os concretos foram usados moldes de 10x20 cm, desmoldados em 24 h e colocados submersos em água saturada com cal até a data do ensaio. Todos estes corpos-de-prova foram capeados com enxofre e rompidos em uma prensa elétrica Shimadzu, modelo UH-2000KNA.



Figura 48 - Molde metálico cilíndrico de concreto.

3.4.1.6 Módulo de elasticidade

O módulo de elasticidade foi determinado aos 28 dias para os concretos, a partir do valor mais alto de um par de corpos-de-prova, visto que, não se dispôs de três exemplares para realizar a média de um par e desprezar o resultado de maior variabilidade.

3.4.2 Avaliação da Auto-Compactibilidade

Para a produção dos concretos auto-adensáveis são imprescindíveis alguns ensaios indispensáveis no estado fresco à sua obtenção, conformidade e avaliação. Com o objetivo de analisar a fluidez, o espalhamento, a segregação, resistência ao bloqueio, estabilidade da mistura, capacidade de passar por espaços estreitos e sua auto-adensibilidade foram realizados os ensaios de espalhamento (*slump flow*), funil-V, caixa-L e caixa-U. Baseando-se nos valores especificados no método Repette-Melo (2005) e na EFNARC (2005), de acordo com a Tabela 14.

Tabela 14 - Limites de aceitação do CAA de acordo com o método de ensaio.

Ensaio	Valores aceitáveis
Slump flow (mm)	600 a 800
Funil-V (s)	3,5 -10 s
Caixa-L (h_2/h_1)	$\geq 0,8$
Caixa-U (mm)	≥ 300

4 APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS

4.1 Argamassas

Os resultados do programa fatorial de experimentos realizado em argamassas com filer calcário e aditivo promotor de viscosidade estão descritos na seqüência, onde serão analisados e verificados os efeitos dos parâmetros variados; a/c, teores de areia, filer e aditivos. Destas argamassas que se enquadraram no critério do método Repette-Melo (2005) foram selecionados traços das distintas séries para correlacioná-las com seus concretos equivalentes.

4.1.1 Teor de agregado miúdo

De acordo com a Figura 49, para os três teores de areia ensaiados (40, 45 e 50 % do volume de argamassa), pôde-se verificar que, com o aumento desse teor, a relação água/cimento também se elevou para o mesmo teor de filer. Isso se deve à maior demanda de água para a pasta poder lubrificar todos os grãos e promover a fluidez da argamassa. Por outro lado, a quantidade de pasta sofre diminuição à medida que se aumenta o teor de agregado miúdo, o que reflete no menor distanciamento entre as partículas e aumenta a probabilidade destas se chocarem entre si.

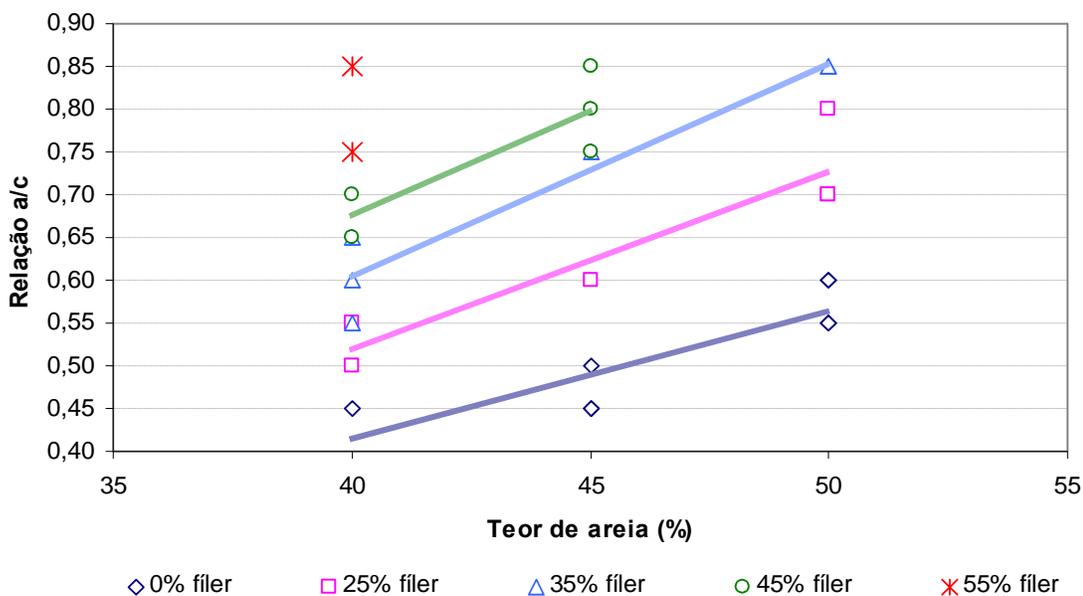


Figura 49 - Influência dos teores de agregado miúdo e filer nas misturas de argamassa.

Com o aumento do teor de areia as substituições de filer foram diminuindo para aquelas misturas com teores mais elevados do mesmo.

O teor de areia que permitiu a confecção de todas as substituições volumétricas de filer ao cimento (25%, 35%, 45% e 55% de filer), segundo Figura 493, foi o de 40 % de areia. Para o teor de 45 % de areia, as substituições de filer foram de 25%, 35% e 45%. Já para 50 % de areia do volume total de argamassa, somente as substituições de 25 % e 35 % foram possíveis.

Em relação aos teores estudados, o único teor que se mostrou mais limitado foi o de 50 % de areia, o qual forneceu argamassas menos coesas com pouca quantidade de pasta, constatado também através da análise visual, sendo a série de menor qualidade de acabamento, no estado endurecido.

Cabe salientar que outras porcentagens de areia deveriam ser testadas abaixo do teor de 50 %, com variações de teores de areia menores dos investigados neste trabalho, com o intuito de se otimizar o método de dosagem, visando a economia.

4.1.2 Teor de filer

Foram variados cinco teores de filer para os três teores de areia, todos em substituição ao volume de cimento, sendo eles: 0, 25, 35, 45 e 55 %. Desse modo, com o aumento do teor de areia para o mesmo teor de filer necessitou-se de um maior consumo de água para se atender aos requisitos dos ensaios de espalhamento e fluidez, e também com o aumento do teor de areia foram-se diminuindo as substituições de filer, como mostrado no item 4.1.1.

Visualiza-se na Figura 493, que para todos os teores de areia testados, quando se elevaram os teores de filer, a relação água/cimento também aumentou, chegando ao limite de substituição de filer onde a relação a/c atingiu o limite superior (0,85) da faixa estabelecida para o presente estudo. Limite este onde os teores de superplastificante encontravam-se nas extremidades superiores do intervalo (0,10; 0,15; 0,20; 0,25 e 0,30 % de teor de sólidos da massa de cimento) estabelecido para a análise, ocasionando resistências mais baixas em decorrência das relações a/c muito elevadas.

Esta elevação da relação água/cimento se dá pelo aumento da quantidade de partículas sólidas inertes na argamassa, pois demandam maiores consumo de água para atenderem aos requisitos especificados. Isso está relacionado com o aumento da quantidade de partículas que retêm água por apresentarem uma superfície específica elevada, onde parte da água fica adsorvida na superfície dos grãos de filer e de agregado miúdo.

Para o teor de 50 % de areia, situação mais desfavorável, por exemplo, foram possíveis de se produzir argamassas com 25 % e 35 % de filer que se enquadravam nos

critérios de Repette-Melo (2005), uma vez que as relações a/c já se encontravam elevada para estes teores.

O teor de filer adequado para o atendimento racional da dosagem, que atendeu aos ensaios de auto-compactabilidade conforme verificados na Tabela 15 para todos os teores de areia utilizados foi aquele referente a 25 % de substituição volumétrica ao cimento, pois este teor manteve-se inserido em níveis coerentes de relação a/c, alcançando resultados satisfatórios de resistência, conforme pode ser observado na mesma tabela. Porém, quando se analisa individualmente os teores de areia, verifica-se que para cada teor de agregado miúdo há um teor de filer ótimo que permite confeccionar argamassas mais econômicas. Por exemplo, no caso de 40 % de areia, o teor de filer referente a 45 % seria o mais adequado economicamente dependendo da resistência especificada; para o conteúdo de 45 % de areia, cabe o teor de 35 % de filer; e para a porcentagem de 50 % de areia, o mais adequado para o atendimento racional e econômico da dosagem fica sendo o teor de 25 % de filer, que se demonstrou ser o mais satisfatório.

As argamassas com filer, conforme visto na Tabela 15, foram identificadas por um código que os primeiros números indicam a porcentagem de cimento na mistura, 100, 75, 65, 55 e 45 %, sendo o seu complemento o teor de filer em porcentagem, 0, 25, 35, 45 e 55 %, respectivamente. A letra maiúscula “P” que segue após os números indica que são misturas com filer calcário. Após o hífen, tem-se um número variando de 1 a 5, que codifica o teor de aditivo superplastificante para 0,10; 0,15; 0,20; 0,25 e 0,30 %, respectivamente. E, por fim, segue a letra que varia de a – i, que representam as relações a/c de 0,45; 0,50; 0,55; 0,60; 0,65; 0,70; 0,75; 0,80 e 0,85.

4.1.3 Teor de aditivo superplastificante e Fluidez das argamassas

O teor de aditivo superplastificante está atrelado diretamente à fluidez da argamassa e concreto, pois é através dele que se pode ter a auto-compactabilidade, garantindo a estabilidade da mistura. A faixa dos teores de aditivo superplastificante à base de policarboxilatos empregada se mostrou adequada para o atendimento das resistências usuais requeridas, dispostas na Tabela 15.

Entretanto, muitas argamassas foram desconsideradas por não atenderem os limites de aceitação de resultados, mas ficaram muito próximas, tanto para o espalhamento (200 a 280 mm) quanto para o tempo de escoamento (5 a 10 s).

Percebeu-se, conforme os resultados apresentado nas Tabela 15, que a relação água/finos para as argamassas com teores de areia superiores a 40 %, excedeu os valores determinados pela EFNARC (2005) de 0,85 a 1,10. Para as argamassas com teor de 45 % apresentaram a relação água/finos bem próxima ao limite especificado por Coppola (2001), que vai até 1,20. Para as séries de 50 % de areia, seja com filer ou APV, a relação volumétrica de água/finos fornece números bastante elevados, conforme pode ser visto nas Tabela 15, Tabela 16 e Tabela 17. Isso está atribuído ao incremento da quantidade de areia e conseqüentemente uma maior demanda de água para o atendimento dos requisitos pré-estabelecidos dos ensaios. Denota-se que com o aumento da quantidade de substituição de filer, para os três teores de areia desta série, a razão água/finos diminui, como mostra a Tabela 15.

Tabela 15 - Argamassas com filer, ensaios de auto-compactabilidade e resistência à compressão.

Teor de areia	Argamassa com filer	Teor de filer (%)	SP (%)	a/c	dm (mm)	Funil-V t (s)	fc28 dias (MPa)	a/f	a/s	Rm/Tm ^{0,4}
40% areia	100P-1a	0	0,10	0,45	265,00	5,40	52,74	1,26	0,52	0,903
	75P-2c	25	0,15	0,55	275,60	5,72	34,28	1,15	0,49	0,822
	75P-3b	25	0,20	0,50	259,40	7,44	44,62	1,05	0,46	0,669
	65P-1e	35	0,10	0,65	214,20	5,65	31,53	1,18	0,50	1,062
	65P-2d	35	0,15	0,60	277,30	5,00	31,14	1,09	0,47	0,935
	65P-3c	35	0,20	0,55	243,00	9,97	41,71	1,00	0,44	0,531
	55P-2f	45	0,15	0,70	235,50	6,53	22,03	1,08	0,47	0,836
	55P-3e	45	0,20	0,65	224,00	9,37	32,14	1,00	0,44	0,612
	45P-3i	55	0,20	0,85	257,00	5,25	20,93	1,07	0,47	0,956
45P-5g	55	0,30	0,75	262,70	9,72	28,90	0,95	0,43	0,506	
45% areia	100P-1b	0	0,10	0,50	210,30	7,84	41,13	1,37	0,49	0,780
	100P-2a	0	0,15	0,45	226,50	9,44	44,82	1,24	0,46	0,601
	100P-3a	0	0,20	0,45	249,50	7,25	53,20	1,23	0,45	0,712
	75P-3d	25	0,20	0,60	263,60	6,31	37,38	1,24	0,46	0,777
	65P-2g	35	0,15	0,75	239,90	5,25	26,64	1,34	0,48	1,021
	55P-2i	45	0,15	0,85	226,10	5,78	20,04	1,29	0,47	0,983
	55P-3h	45	0,20	0,80	230,50	7,78	19,71	1,21	0,45	0,716
	55P-4g	45	0,25	0,75	275,10	8,59	23,17	1,14	0,43	0,548
50% areia	100P-2d	0	0,15	0,60	212,00	7,50	32,88	1,60	0,47	0,808
	100P-3d	0	0,20	0,60	248,30	6,03	35,65	1,59	0,47	0,860
	100P-5c	0	0,25	0,55	261,47	8,00	40,67	1,46	0,44	0,617
	100P-4c	0	0,30	0,55	274,20	7,50	44,13	1,46	0,44	0,630
	75P-3h	25	0,20	0,80	217,50	5,72	20,68	1,60	0,47	1,033
	75P-4f	25	0,25	0,70	218,40	9,31	26,20	1,41	0,43	0,632
	75P-5f	25	0,30	0,70	235,70	9,94	29,29	1,40	0,43	0,549
	65P-4i	35	0,25	0,85	213,90	9,41	20,25	1,48	0,45	0,638
65P-5i	35	0,30	0,85	237,80	7,15	21,29	1,47	0,45	0,756	

SP: aditivo superplastificante de base policarboxilatos, dm: diâmetro de espalhamento médio, a/f: relação do volume de água pelo volume finos, a/s: relação do volume de água pelo volume de sólidos.

Tendo em vista a relação entre os parâmetros de deformabilidade e viscosidade da argamassa proposto por Okamura, item 2.12.4, Equação 6, ela deve corresponder ao valor 0,525. Nestes termos, observou-se, ao analisar as Tabela 15, Tabela 16 e Tabela 17, que as argamassas que se aproximaram desse valor foram aquelas que possuíram maior tempo de escoamento no ensaio do Funil-V. Este tempo foi o maior fator determinante para o cumprimento do parâmetro analisado, isso para variadas argamassas dos diversos grupos. Espera-se, no entanto, que para as misturas com maior consumo de fíler, o qual diminui o custo do concreto e aumenta naturalmente a viscosidade das argamassas, tem-se tempos menores no Funil-V, atendendo assim a esse requisito com maior regularidade. Por esse motivo, Melo (2005) infere que as argamassas dos CAAs que respeitaram esta relação de Okamura foram consideradas como as mais econômicas.

Tabela 16 - Argamassas com APV, ensaios de auto-compactabilidade e seus parâmetros.

Teor de areia	Argamassa com APV	Teor de APV (%)	SP (%)	a/c	dm (mm)	Funil-V t (s)	Rm	Γ m	a/f	a/s	$Rm/\Gamma m^{0,4}$
50% areia	100MV-2E2	0,20	0,15	0,65	209,50	5,85	1,71	3,39	1,720	0,49	1,049
	100MV-3D2	0,20	0,20	0,60	234,33	9,09	1,10	4,49	1,593	0,47	0,603
	100MV-4D2	0,20	0,25	0,60	246,00	6,44	1,55	5,05	1,589	0,46	0,812
	100MV-5D2	0,20	0,30	0,60	249,90	7,71	1,30	5,25	1,586	0,46	0,668
	100MV-2F3	0,30	0,15	0,70	217,17	6,75	1,48	3,72	1,843	0,51	0,876
	100MV-3E3	0,30	0,20	0,65	232,30	6,53	1,53	4,40	1,717	0,49	0,847
	100MV-4E3	0,30	0,25	0,65	237,37	5,56	1,80	4,63	1,713	0,48	0,974
	100MV-5D3	0,30	0,30	0,60	244,57	7,50	1,33	4,98	1,586	0,46	0,701
	100MV-3E4	0,40	0,20	0,65	236,17	6,39	1,56	4,58	1,717	0,49	0,852
	100MV-4E4	0,40	0,25	0,65	249,13	5,34	1,87	5,21	1,713	0,48	0,968
	100MV-5D4	0,40	0,30	0,60	246,40	8,50	1,18	5,07	1,586	0,46	0,615
	100MV-2G5	0,50	0,15	0,75	221,77	5,12	1,95	3,92	1,964	0,52	1,131
	100MV-4E5	0,50	0,25	0,65	251,13	7,34	1,36	5,31	1,713	0,48	0,699
	100MV-5E5	0,50	0,30	0,65	270,17	6,59	1,52	6,30	1,710	0,48	0,727
	100MV-3F6	0,60	0,20	0,70	262,70	5,57	1,80	5,90	1,839	0,50	0,883
100MV-4E6	0,60	0,25	0,65	255,37	7,38	1,36	5,52	1,713	0,48	0,684	
100MV-5F6	0,60	0,30	0,70	270,50	6,58	1,52	6,32	1,832	0,50	0,727	

As argamassas da primeira série com APV, conforme observado na Tabela 16, foram identificadas com o número “100” equivalendo ao teor de cimento em porcentagem. As letras maiúsculas “MV” que seguem após os números indicam que são misturas com aditivo promotor de viscosidade. Após o hífen, tem-se um número variando de 1 a 5, que codifica o teor de aditivo superplastificante para 0,10; 0,15; 0,20; 0,25 e 0,30 %, respectivamente.

Seguida da letra que varia de a – i, que representa a relação a/c que são 0,45; 0,50; 0,55; 0,60; 0,65; 0,70; 0,75; 0,80 e 0,85. E, por fim, o código que varia de 1 a 5, que identifica o teor de APV, respectivamente, 0,2; 0,3; 0,4; 0,5 e 0,6 %.

Tabela 17 - Argamassas com APV em substituição a 25 % de filer, ensaios de auto-compactabilidade e seus parâmetros.

Teor de areia	Argamassa com APV em substituição ao filer	Teor de APV (%)	SP (%)	a/c	dm (mm)	Funil-V t (s)	Rm	Γ m	a/f	a/s	$Rm/\Gamma m^{0,4}$
50% areia	75MV-3H2	0,20	0,20	0,80	205,17	5,78	1,73	3,21	1,720	0,49	1,085
	75MV-4G2	0,20	0,25	0,60	202,50	7,12	1,40	3,10	1,593	0,47	0,893
	75MV-5F2	0,20	0,30	0,60	214,63	8,78	1,14	3,61	1,589	0,46	0,682
	75MV-3H3	0,30	0,20	0,80	214,80	6,28	1,59	3,61	1,586	0,46	0,952
	75MV-4H3	0,30	0,25	0,80	201,50	7,28	1,37	3,06	1,843	0,51	0,878
	75MV-5G3	0,30	0,30	0,75	204,27	7,72	1,30	3,17	1,717	0,49	0,816
	75MV-4H4	0,40	0,25	0,80	208,30	5,12	1,95	3,34	1,713	0,48	1,206
	75M -5H4	0,40	0,30	0,80	212,47	5,94	1,68	3,51	1,717	0,49	1,018
	75MV-4H5	0,50	0,25	0,80	201,67	6,13	1,63	3,07	1,713	0,48	1,042
	75MV-5H5	0,50	0,30	0,80	214,20	5,88	1,70	3,59	1,586	0,46	1,020
	75MV-4H6	0,60	0,25	0,75	203,20	6,53	1,53	3,13	1,964	0,52	0,970
	75MV-5H6	0,60	0,30	0,65	209,57	5,91	1,69	3,39	1,713	0,48	1,038

As argamassas da segunda série com APV, conforme observado na Tabela 17, foram identificadas com o número equivalendo ao teor de cimento em substituição ao filer, com apenas as argamassas com 75 % de cimento e 25 % de filer em substituição ao cimento, ou seja, o menor teor de filer a ser substituído pelo APV. O restante da nomenclatura permanece igual a primeira série de APV.

Foram ensaiados vários traços de argamassas com filer e aditivo promotor de viscosidade, dentre os quais os que se enquadraram nas faixas requisitadas, com menor água/cimento possível, e assim priorizando o aspecto econômico, onde seguem expressos nas Tabela 15, Tabela 16 e Tabela 17.

Os resultados em termos de espalhamento e tempo de escoamento foram colocados em um gráfico em função das suas áreas de espalhamentos relativas e seus tempos de escoamentos relativos, como mostra a Figura 50, atendendo os limites da faixa de resultado de ensaio propostos por Repette-Melo (2005) e Edamatsu et al (1999).

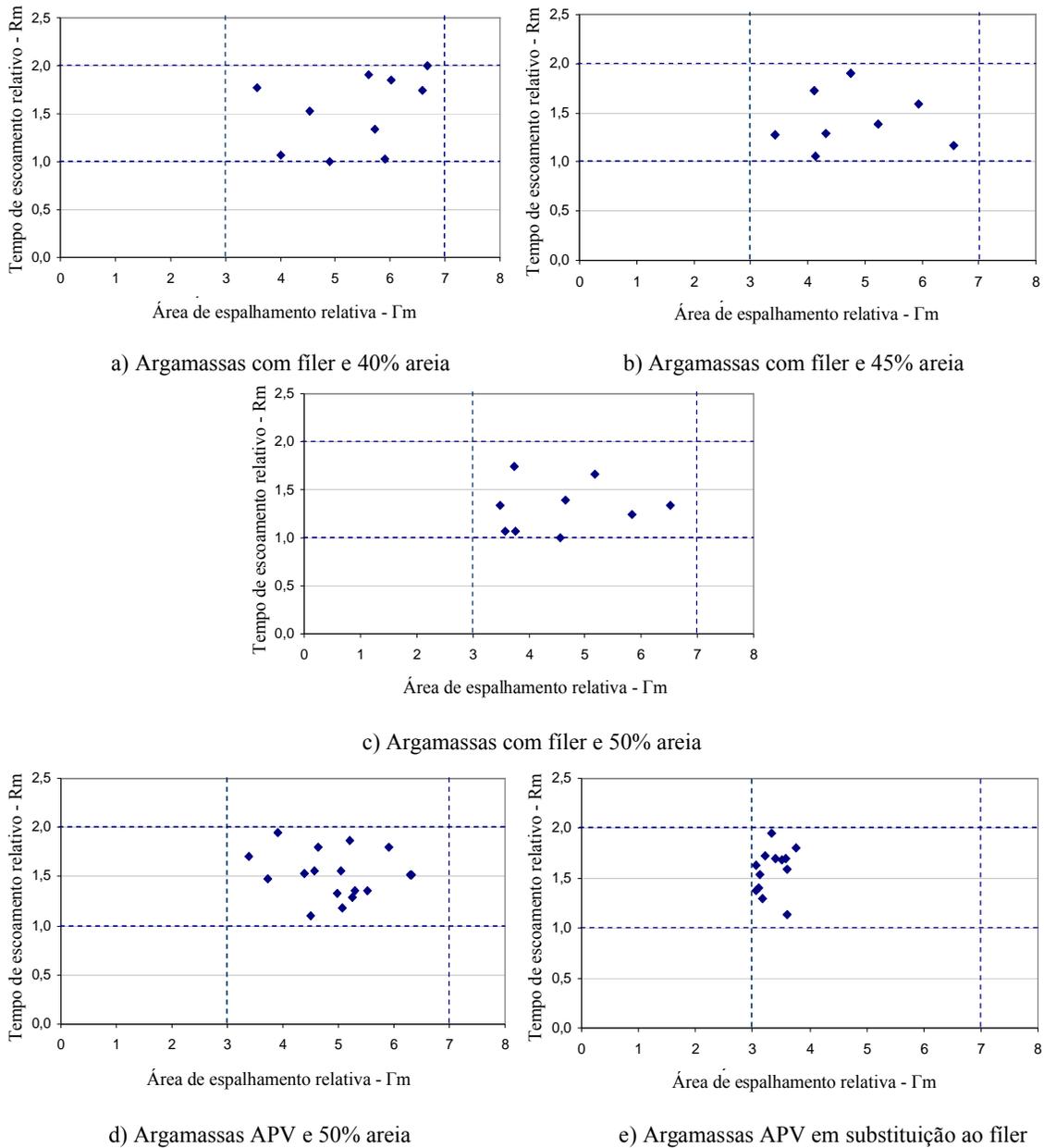


Figura 50 - Relação entre área de espalhamento e tempo de escoamento relativos para argamassas com filer e APV.

A uniformidade do comportamento das argamassas mostrado na Figura 50e) indica a relação água/finos deve ser respeitada, pois neste caso, esta foi elevada excessivamente para se testar à substituição do filer pelo APV na mistura. Estas argamassas apresentaram espalhamentos baixos, conferindo maiores tensões de escoamento, e tempos de escoamentos baixos, mesmo estando dentro da faixa pré-estabelecida, observa-se que a viscosidade das argamassas encontrava-se baixa, faltando coesão à mistura.

Em relação à razão água/finos, notaram-se diferenças entre os diversos grupos analisados, as quais foram elevando-se com o aumento do teor de areia, pois além da diminuição gradual da quantidade de pasta nas argamassas, houve também maior demanda de água, a qual elevou esta razão. Isso ocorreu em virtude do intuito de se racionalizar o traço, empregando assim, menores quantidades de aditivo superplastificante.

De acordo com o esperado, à medida que a relação água/cimento das argamassas eleva-se, o teor de aditivo superplastificante de base policarboxilatos diminui para todas as faixas de teores de filer.

Os teores de aditivos superplastificantes pré-estabelecidos forneceram maior previsibilidade para o grupo de 40 % de areia, ou seja, com os incrementos estabelecidos de aditivo o comportamento da argamassa segue uma tendência de redução proporcional e linear da a/c, como mostra a Figura 51. Este fato deve-se a uma maior quantidade de pasta que esta mistura tem em relação às demais, e assim, o aditivo age mais eficientemente, ou seja, sobre uma quantidade maior de partículas de cimento, aumentando a fluidez da argamassa com menores teores de aditivos e de forma mais regular por apresentar maior sensibilidade às variações de aditivo superplastificante pré-determinadas, apresentando, desse modo, um comportamento linear ao aumento do teor de aditivo observado para todos os teores de substituição de filer para esta série.

Foram relativamente baixos os teores de aditivo superplastificante, neste grupo, em comparação com as próximas séries a serem abordadas.

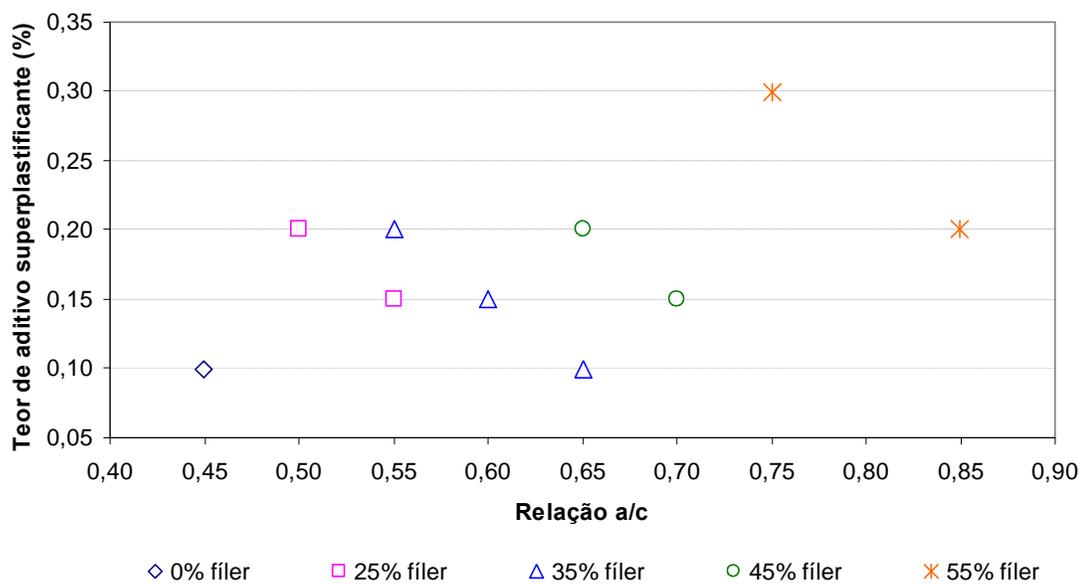


Figura 51 - Comportamento do aditivo SP com o aumento do teor de filer, para argamassas com 40% areia.

No grupo com filer e 45 % areia, menores quantidades de argamassas aparecem para as várias relações a/c, pois não apresentaram conformidade com os critérios de Repette-Melo na hora da confecção, principalmente para os teores de 25 e 35% de substituição de filer. Com os resultados obtidos, mostrados conforme Figura 52, observa-se que para os mesmos teores de filer empregados na série acima, as relações a/c foram maiores, com o aumento dos teores de filer, pois seu conteúdo de areia também foi incrementado.

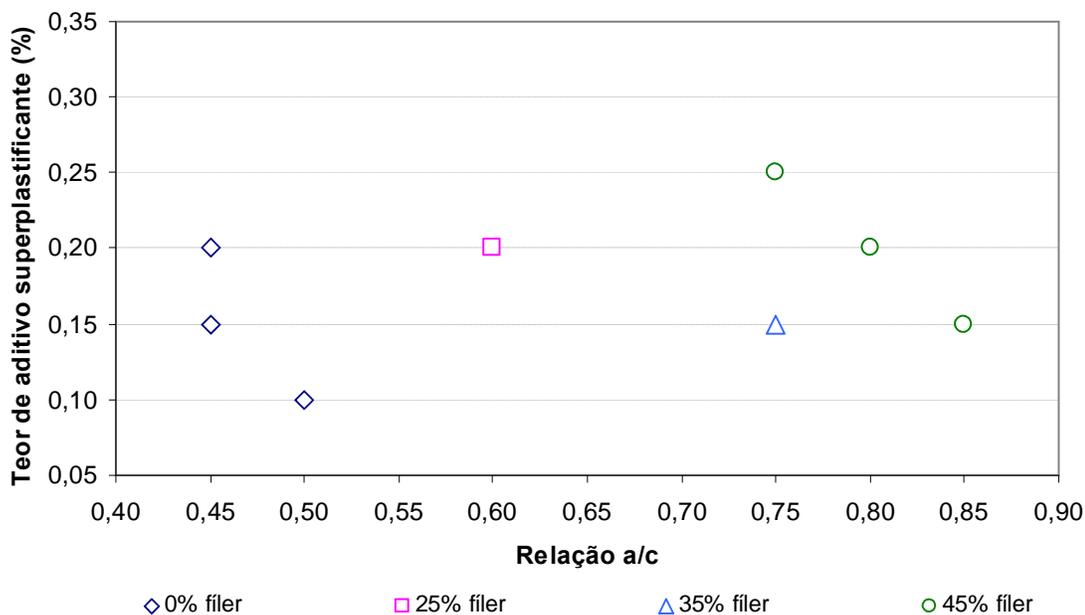


Figura 52 - Comportamento do aditivo SP com o aumento do teor de filer, para argamassas com 45% areia.

Este conteúdo de água é necessário para diminuir a viscosidade da pasta e a resistência ao cisalhamento das partículas, para que esta se transforme em suspensão e lubrifique os agregados, o que pode ser visualizado na Figura 53, através das etapas 1, 2, 3 e 4, promovendo o espalhamento e escoamento da argamassa. Entretanto, se o conteúdo de aditivo fosse elevado a níveis maiores que os estudados, possivelmente esse conteúdo de água mínimo iria diminuir, incorrendo na diminuição da tensão de escoamento dessa pasta. Contudo, estas misturas, teriam de ser ensaiadas para a verificação de seus comportamentos e interações, podendo-se com isso alcançar teores muito elevados de aditivos superplastificante e/ou a atingir o teor de saturação do mesmo, ponto no qual, além dele, o aumento do conteúdo de aditivo não contribui mais para o aumento da fluidez da mistura.

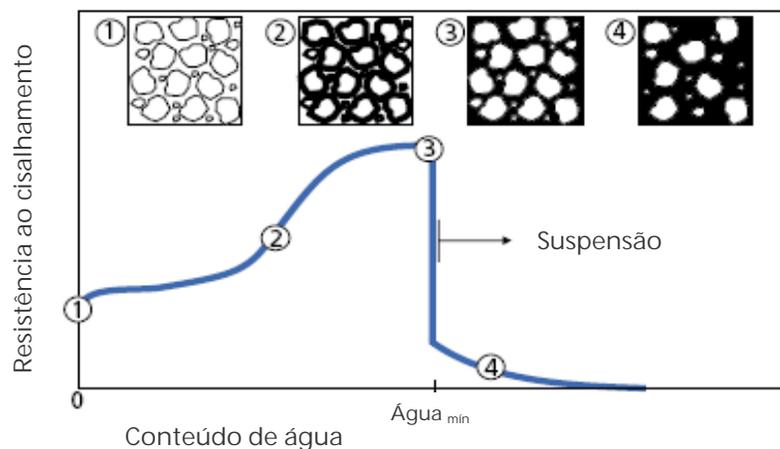


Figura 53 - Conteúdo de água necessário para a conversão das partículas sólidas em suspensão (KORDTS e BREIT, 2003).

Nota-se na Figura 54, que as argamassas com 50% de areia necessitaram de teores mais elevados de aditivo superplastificante para satisfazerem as condições determinadas, e o teor de filer em substituição ao cimento também foi reduzido pelo aumento do conteúdo de areia. Dessa maneira, os teores de aditivos utilizados foram elevados para promover a fluidez, mas atingiram o ponto de saturação, tanto para as misturas com 100% de cimento como também para as argamassas com filer até o teor máximo conseguido de 35%. Assim, verifica-se que o aumento do teor de aditivo não aumenta em muito a fluidez da mesma, fazendo com que essas misturas, ainda permaneçam na faixa de aceitação delimitada, e estando bem próximo, dessa forma, o teor de saturação do aditivo. Isso ocorre pelo fato destas argamassas possuírem menor quantidade de pasta que as demais, e assim o efeito do aditivo superplastificante é menos eficaz que as anteriores. Por este motivo, não se conseguiu para estas argamassas diminuir a relação água/cimento com a variação de aditivo superplastificante utilizada, com o aumento do seu teor, como ocorrido com a série de 40% e 45% de areia.

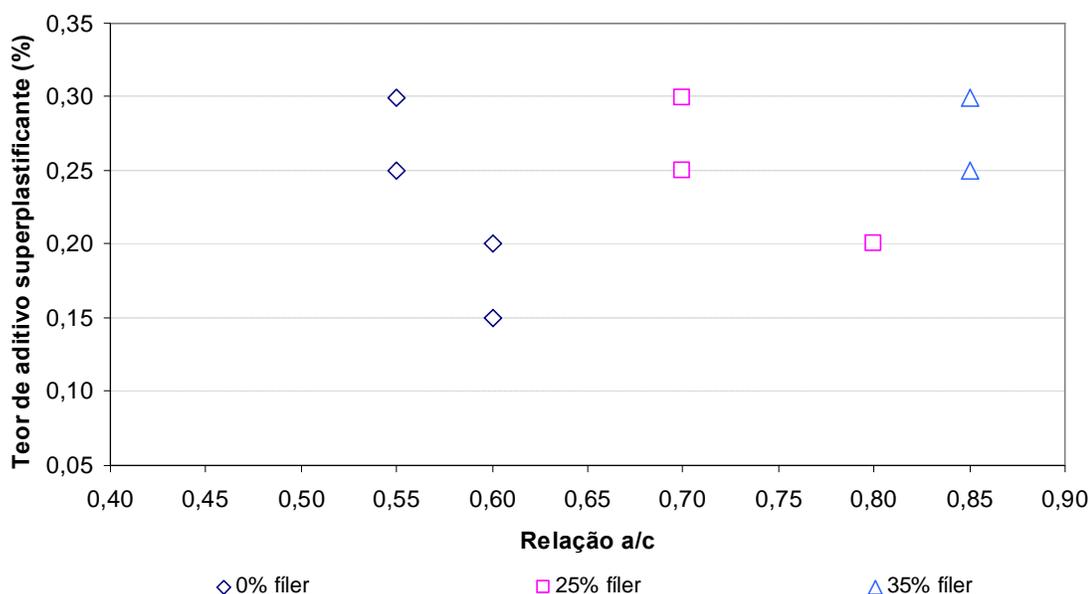


Figura 54 - Comportamento do aditivo SP com o aumento do teor de filer, para argamassas com 50% areia.

As argamassas da série com emprego do APV mostraram-se pouco sensíveis ao aumento do teor de aditivo superplastificante para as variações do APV, como mostra a Figura 55. Para grande parte dessas argamassas, a relação a/c foi mantida para o mesmo teor de APV com o aumento do aditivo superplastificante. Isso pode estar relacionado, a faixa de teor do APV usado, demonstrando estabilidade de comportamento frente a variações de aditivos superplastificante e relações a/c, compreendidas na faixa predominante entre 0,60 e 0,70. Pode também, estar ligado ao tipo de misturador, velocidade e tempo de mistura do APV com os demais materiais, tendo em vista que este aditivo atua na água e forma redes que podem se desintegrar caso o tempo e a velocidade de mistura não forem adequados ao tipo de misturador.

O mesmo pode ser visto com a série de APV em substituição a 25% de filer, porém este grupo demandou um maior consumo de água e aditivo superplastificante. Isso está diretamente atrelado à diminuição de finos, propositalmente, para verificar se este aditivo desempenharia a função do filer na mistura. O que fica evidente com os resultados da Figura 56 é que o APV não conseguiu reter a água da mistura como o filer, pois este possui elevada superfície específica a qual é responsável pela retenção de uma parcela significativa da água da mistura.

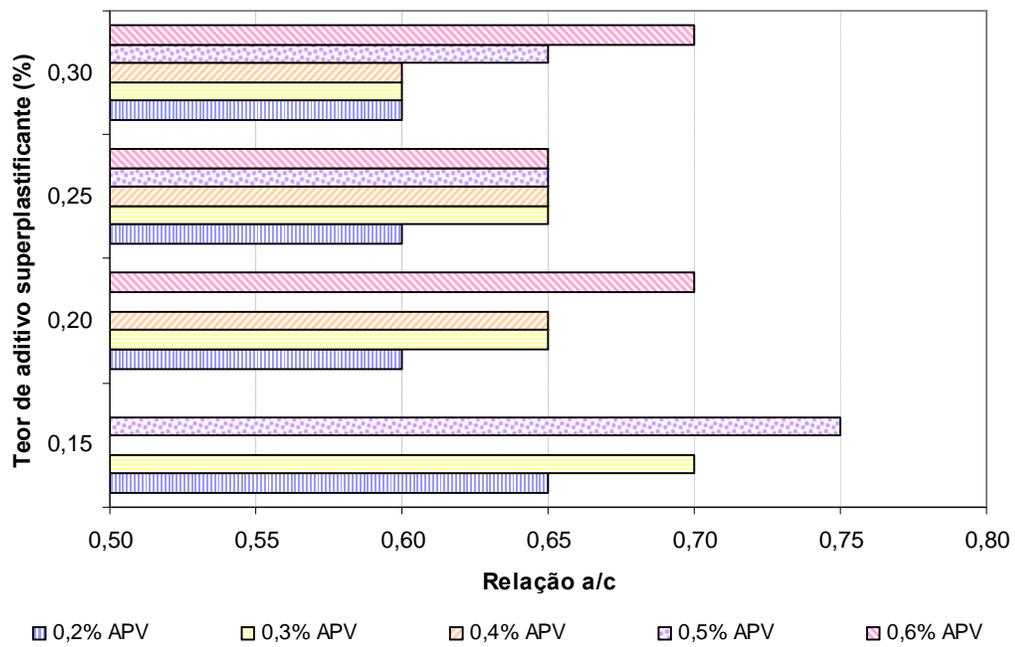


Figura 55 - Teor do aditivo SP com o aumento do teor de APV para argamassas auto-adensáveis.

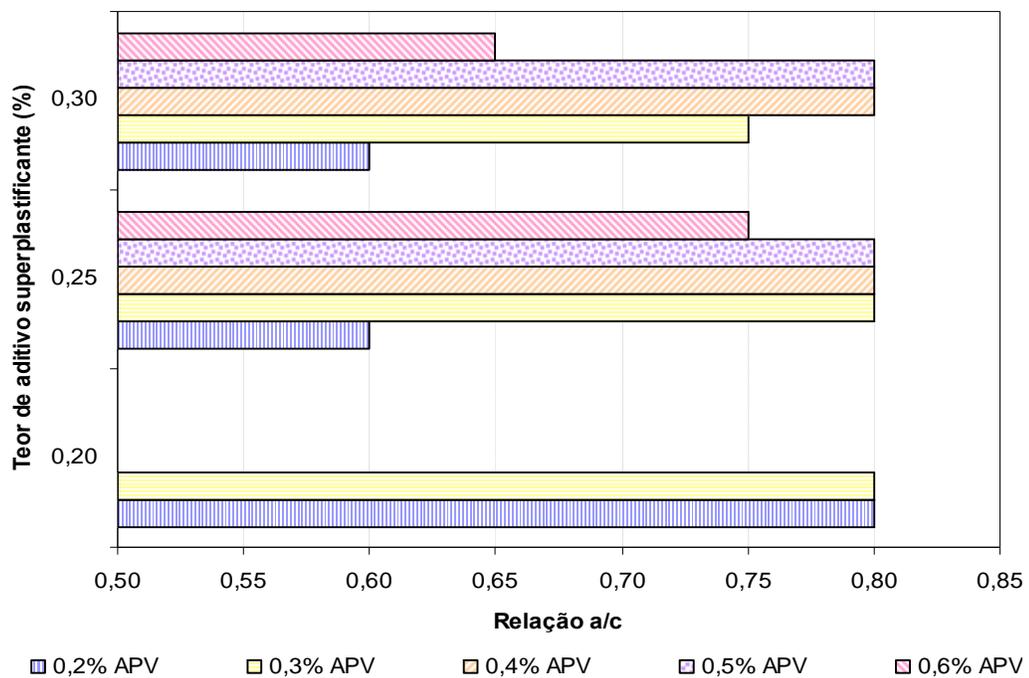


Figura 56 - Teor do aditivo SP com o aumento do teor de filer, para argamassas com APV em substituição ao filer para argamassas auto-adensáveis.

4.1.4 Teor de aditivo promotor de viscosidade

Nas argamassas, para todos os teores de aditivo promotor de viscosidade testados (0,2; 0,3; 0,4; 0,5 e 0,6 % em relação a massa de cimento), com o mínimo de 50 % de areia em volume na argamassa e para os cinco teores de aditivo superplastificante variados, a faixa de relação água/cimento de atuação do APV ficou compreendida entre 0,60 e 0,70, praticamente, como mostra a Figura 57.

Nestes termos, nota-se que há necessidade de se investigar com maior abrangência o seu modo de atuação, bem como sua eficiência, relacionando-o com o procedimento de mistura em função do tempo e velocidade de mistura. Na medida em que o APV atua na água da mistura formando redes para suspender as partículas finas da mesma e assim promover maior viscosidade, o tempo ou a velocidade da mistura podem influenciar na formação ou quebra destas redes conforme verificado em um estudo piloto no GTec- Grupo de Tecnologia em Materiais e Componentes à base de Cimento Portland.

O processo da mistura foi investigado, pois diante de sua adição no início da confecção da mesma, o APV se mostrou ineficiente, provocando exsudação e segregação à argamassa. E quando colocado no final do processo de mistura suas características reológicas mudaram totalmente, apesar da maioria das argamassas demonstrarem menor coesão em comparação com as argamassas com filler.

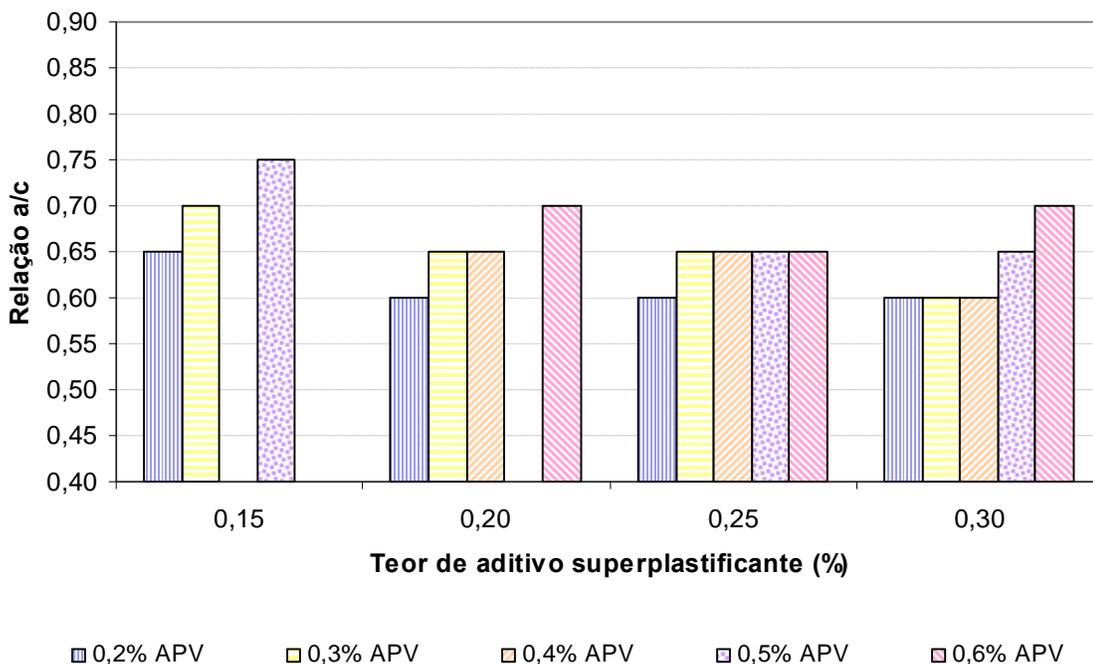


Figura 57 - Variação dos teores de aditivos promotores de viscosidade para as argamassas desta série.

4.1.5 Perda de fluidez com o tempo

De acordo com Ghezal (2003), a perda de fluidez é um fator crítico para o CAA, o qual reduz sua capacidade de preenchimento e de passagem e também a resistência à compressão.

A perda de fluidez foi analisada através das medidas sucessivas para um determinado traço de argamassa. Foram variados somente os teores de aditivo promotor de viscosidade em 0,025 %, correspondendo a teores de 0,200 %; 0,225 % e 0,250 %, e também o seu modo de aplicação, ou seja, sendo adicionado às argamassas no início da mistura com a água do traço ou sendo adicionado no final da mistura. Estes teores foram comparados com uma argamassa de referência, isto é, sem aditivo promotor de viscosidade e outra com a utilização de 25 % de filler. Todas possuindo 50 % de areia, a/c de 0,80 e aditivo superplastificante igual a 0,20 %.

Constatou-se que, para as argamassas que receberam o APV no início da mistura apresentaram falta de coesão e homogeneidade, transparecendo visualmente aspectos de exsudação e segregação, e exibindo um acúmulo de agregados, no centro do círculo formado pela mistura, no ensaio de espalhamento. Desse modo, optou-se em adicionar APV às argamassas no final da mistura, conforme procedimento citado no item 3.3.1.

Todas as argamassas perderam fluidez num período curto de tempo (entre 8 e 25 minutos), sendo que aquelas que se encontravam no limite inferior da faixa requisitada pelos critérios de auto-adensabilidade não se enquadravam mais, como mostra a Figura 58. Seria interessante que estas argamassas apresentassem um valor elevado de espalhamento inicial, ou seja, com valores próximos ao limite superior (280 mm). Neste caso, ao perderem a fluidez, poderiam supostamente serem enquadradas na faixa aceitável de fluidez.

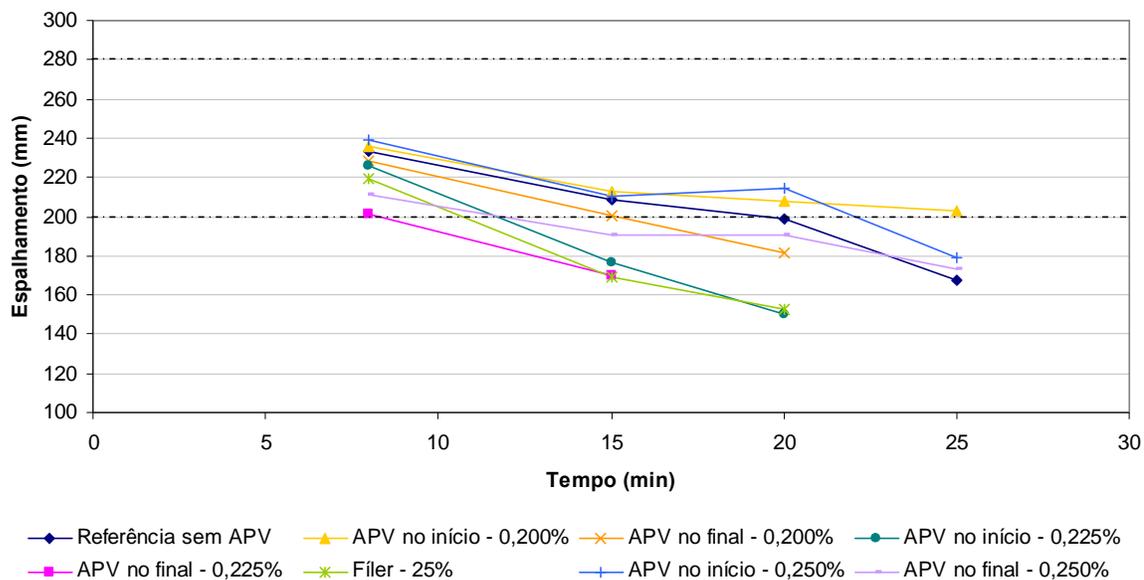


Figura 58 - Perda de fluidez de uma argamassa com o tempo

Os diferentes teores de APV aplicados às argamassas, não tiveram um comportamento diferenciado com relação à perda de fluidez, fator este que pode estar relacionado à pequena variação de dosagem entre eles. Por isso, para a concretização do estudo, foram empregadas maiores variações, de 0,1 %, numa faixa estabelecida entre 0,1 % a 0,6 % de APV, que vai ao encontro à recomendada pelo fabricante.

4.1.6 Massa específica e teor de ar aprisionado

Na literatura, encontram-se diversas recomendações para os valores limites de porcentagem de vazios no CAA. A EFNARC (2002) especifica um teor de apenas 2 %. Já Okamura e Ouchi (1999) e Edamatsu (1999), estabelecem uma faixa de tolerância entre 4 a 7 % de teor de vazios. O teor de ar incorporado desejado, na maioria das situações, deve ser o menor possível, para que se tenha maior densidade e conseqüentemente maior resistência à compressão. Todas as argamassas do grupo de 40 % mantiveram-se dentro do critério proposto por Repette-Melo (2005) e as demais argamassas confeccionadas com fíler praticamente atenderam a conformidade dos teores de vazios, conforme observado na Tabela 18. Porém, estes dados se mostram elevados, quando comparados com o limite estabelecido pela EFNARC (2002).

Observa-se, com maior evidência, para as séries com APV, conforme as Tabela 19 e Tabela 20, que as argamassas que possuem menor teor de aditivo superplastificante tiveram maior porcentagem de vazios, mesmo para as argamassas com mesma relação água/cimento.

Acredita-se que no estado fresco, em função do efeito do aditivo superplastificante promover maior fluidificação da mistura, o ar incorporado durante o processo de mistura seja liberado com maior facilidade devido à menor viscosidade da pasta. O aumento do teor de aditivo promotor de viscosidade não teve influência em relação ao aumento ou diminuição do teor de vazios, como pode ser verificado na Tabela 19.

Tabela 18 - Argamassas com filer e suas massas específicas e teores de ar incorporado.

Tipo	Teor de Areia	Traços	% Aditivo Superpl.	% Filer	a/c	γ (Kg/dm ³)	% Vazios
Argamassas com Filer calcário dolomítico	40% areia	100P-1a	0,10	0	0,45	2,087	3,28
		75P-2c	0,15	25	0,55	2,076	4,45
		75P-3b	0,20	25	0,50	2,098	4,65
		65P-1e	0,10	35	0,65	2,059	4,74
		65P-2d	0,15	35	0,60	2,059	5,77
		65P-3c	0,20	35	0,55	2,107	4,67
		55P-2f	0,15	45	0,70	2,040	6,61
		55P-3e	0,20	45	0,65	2,071	6,09
		45P-3i	0,20	55	0,85	2,029	7,02
		45P-5g	0,30	55	0,75	2,124	4,25
Argamassas com Filer calcário dolomítico	45% areia	100P-1b	0,10	0	0,50	2,064	4,82
		100P-2a	0,15	0	0,45	2,070	5,74
		100P-3a	0,20	0	0,45	2,124	3,28
		75P-3d	0,20	25	0,60	2,078	5,01
		65P-2g	0,15	35	0,75	2,035	5,93
		55P-2i	0,15	45	0,85	1,986	8,48
		55P-3h	0,20	45	0,80	1,976	9,62
		55P-4g	0,25	45	0,75	2,014	8,57
Argamassas com Filer calcário dolomítico	50% areia	100P-2d	0,15	0	0,60	1,988	8,24
		100P-3d	0,20	0	0,60	2,029	6,39
		100P-4c	0,25	0	0,55	2,073	5,23
		100P-5c	0,30	0	0,55	2,140	2,18
		75P-3h	0,20	25	0,80	1,987	7,99
		75P-4f	0,25	25	0,70	1,999	8,73
		75P-5f	0,30	25	0,70	2,048	6,51
		65P-4i	0,25	35	0,85	1,980	9,02
		65P-5i	0,30	35	0,85	2,027	6,86

Tabela 19 - Argamassas APV e suas massas específicas e teores de ar incorporado.

Tipo	Teor de areia	Traços	% Aditivo Superpl.	Teores de APV (%)	a/c	γ (Kg/dm ³)	% Vazios
Argamassas com aditivo promotor de viscosidade (APV)	50% areia	100MV-2E2	0,15	0,20	0,65	1,935	9,93
		100MV-3D2	0,20	0,20	0,60	1,980	8,59
		100MV-4D2	0,25	0,20	0,60	2,023	6,64
		100MV-5D2	0,30	0,20	0,60	2,057	5,04
		100MV-2F3	0,15	0,30	0,70	1,952	8,43
		100MV-3E3	0,20	0,30	0,65	1,931	10,09
		100MV-4E3	0,25	0,30	0,65	1,965	8,51
		100MV-5D3	0,30	0,30	0,60	2,013	7,09
		100MV-3E4	0,20	0,40	0,65	1,930	10,12
		100MV-4E4	0,25	0,40	0,65	1,983	7,65
		100MV-5D4	0,30	0,40	0,60	2,042	5,73
		100MV-2G5	0,15	0,50	0,75	1,963	7,25
		100MV-4E5	0,25	0,50	0,65	1,984	7,62
		100MV-5E5	0,30	0,50	0,65	2,013	6,28
		100MV-3F6	0,20	0,60	0,70	1,91	10,19
100MV-4E6	0,25	0,60	0,65	1,99	7,42		
100MV-5F6	0,30	0,60	0,70	2,07	2,95		

Tabela 20 - Argamassas APV em substituição ao filer e suas massas específicas e teores de ar incorporado.

Tipo	Teor de areia	Traços	% Aditivo Superpl.	Teores de APV (%)	a/c	γ (Kg/dm ³)	% Vazios
Argamassas com aditivo promotor de viscosidade (APV)	50% areia e 75% cimento	75MV - 3H2	0,20	0,20	0,80	1,901	10,62
		75MV - 4G2	0,25	0,20	0,60	1,976	7,71
		75MV - 5F2	0,30	0,20	0,60	1,980	8,19
		75MV - 3H3	0,20	0,30	0,80	1,906	10,41
		75MV - 4H3	0,25	0,30	0,80	1,969	7,44
		75MV - 5G3	0,30	0,30	0,75	1,969	8,05
		75MV - 4H4	0,25	0,40	0,80	1,933	10,03
		75MV - 5H4	0,30	0,40	0,80	1,976	7,08
		75MV - 4H5	0,25	0,50	0,80	1,925	9,44
		75MV - 5H5	0,30	0,50	0,80	1,958	7,92
		75MV - 4H6	0,25	0,60	0,75	1,925	9,42
		75MV - 5H6	0,30	0,60	0,65	1,990	6,41

4.1.7 Tempo de início do aumento de temperatura

O tempo início do aumento de temperatura das argamassas, após o período de dormência, que é relacionável com a evolução da hidratação do cimento, foi obtido a partir do

aparato descrito no item 3.2.5, o qual forneceu através do programa Agient, as temperaturas das argamassas em intervalos de dez minutos. Com estes registros, pôde-se verificar o tempo de início de aumento da temperatura das argamassas, bem como a sua curva de liberação de calor, tendo em vista que as reações de hidratação do cimento são exotérmicas.

Segue a Tabela 21, com as características dos traços conformes e também os tempos de início da evolução do aumento da temperatura, obtidos pela análise visual do início da ascensão da curva do gráfico, conforme a Figura 59, ou seja, o início da elevação da temperatura ou à evolução da hidratação do cimento. Todos esses dados foram colocados em gráficos para se verificar a evolução do aumento da temperatura das misturas. A título de exemplificação, será apresentada uma seqüência de curvas das argamassas da série com filer e 50% de areia, de acordo com a Figura 59.

Tabela 21 - Argamassas da série com filer e o tempo de início do aumento da temperatura.

Tipo	Teor de Areia	Traços	% Aditivo Superpl.	% Filer	a/c	t _{aumento} . temperatura (h)
Argamassas com Filer calcário dolomítico	40% areia	100P-1A	0,10	0	0,45	6,17
		75P-2C	0,15	25	0,55	7,33
		75P-3B	0,20	25	0,50	8,00
		65P-1E	0,10	35	0,65	5,17
		65P-2D	0,15	35	0,60	5,50
		65P-3C	0,20	35	0,55	7,33
		55P-2F	0,15	45	0,70	5,83
		55P-3E	0,20	45	0,65	6,17
		45P-3I	0,20	55	0,85	7,00
		45P-5G	0,30	55	0,75	8,00
Argamassas com Filer calcário dolomítico	45% areia	100P-1B	0,10	0	0,50	5,17
		100P-2A	0,15	0	0,45	6,00
		100P-3A	0,20	0	0,45	6,17
		75P-3D	0,20	25	0,60	8,33
		65P-2G	0,15	35	0,75	6,33
		55P-2I	0,15	45	0,85	7,67
		55P-3H	0,20	45	0,80	6,67
		55P-4G	0,25	45	0,75	8,50
Argamassas com Filer calcário dolomítico	50% areia	100P-2D	0,15	0	0,60	8,17
		100P-3D	0,20	0	0,60	11,67
		100P-4C	0,25	0	0,55	8,67
		100P-5C	0,30	0	0,55	8,50
		75P-3H	0,20	25	0,80	8,67
		75P-4F	0,25	25	0,70	10,00
		75P-5F	0,30	25	0,70	12,33
		65P-4I	0,25	35	0,85	11,00
		65P-5I	0,30	35	0,85	11,67

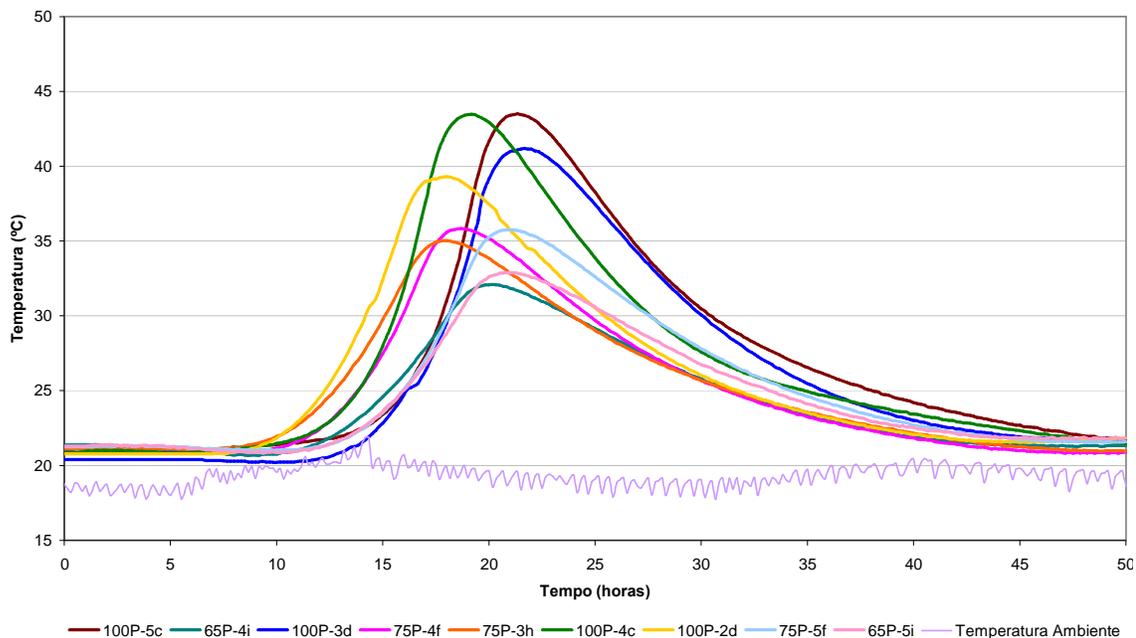


Figura 59 - Curvas da evolução de temperatura das argamassas com filer e 50% areia.

É possível perceber que os picos de temperaturas, ou os pontos de inflexão das curvas, variaram à medida que os teores de filer aumentaram em substituição ao cimento, pois estas argamassas apresentaram um menor gradiente de temperatura. Supõe-se que isso deve estar relacionado ao fato das mesmas possuírem menos partículas reativas de cimento e mais partículas de material inerte (no caso o filer calcário) na composição da mistura. Esse comportamento foi constatado para as demais misturas.

Com o procedimento utilizado, é possível diagnosticar a evolução da hidratação do cimento das argamassas, como também a o início da elevação da temperatura. Saber da máxima temperatura despreendida pela argamassa se torna interessante.

Os ápices de temperaturas também diferiram dentre as três séries de argamassas com filer relativamente, verificando-se uma diminuição gradativa entre as séries de 40 %, 45 % e 50 % de areia respectivamente. Ou seja, as misturas com maior teor de pasta de cimento apresentaram temperaturas mais elevadas em comparação com os mesmos teores de substituição de filer.

Percebe-se que para a série das argamassas com filer, os tempos de início de aumento da temperatura, para a maioria das misturas, elevou-se com o aumento do teor de areia, como pode ser observado na Figura 60, pois misturas que apresentam menores quantidades de pasta demandarão menor liberação de aumento de temperatura.

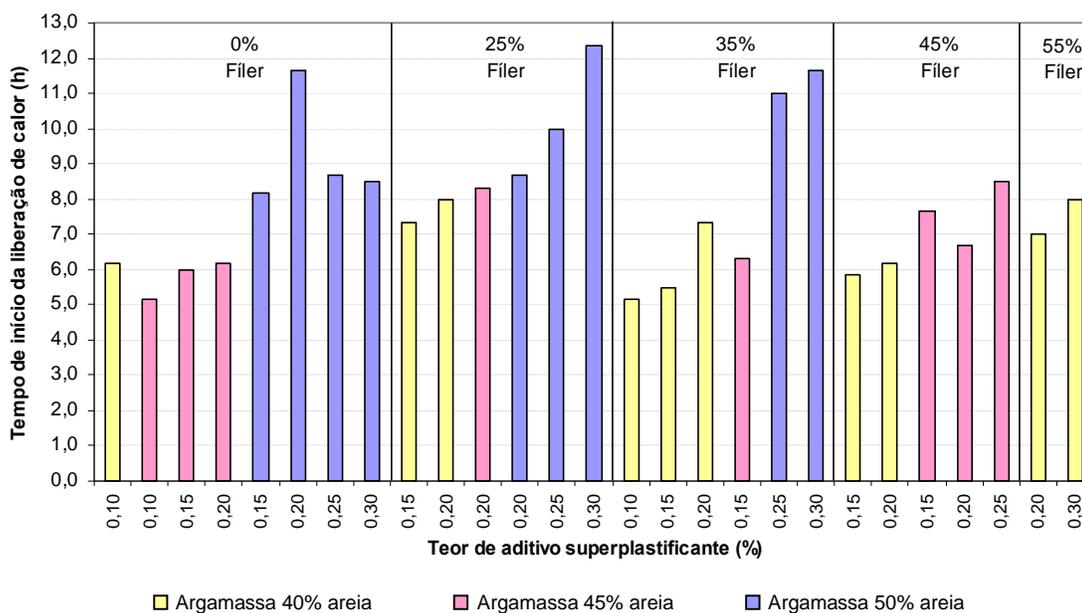


Figura 60 - Tempo de início da liberação de calor das argamassas com filler.

Destaca-se que, para a grande parte das argamassas, o tempo de liberação da temperatura é maior para as misturas com maior teor de superplastificante empregado, quando comparadas argamassas de mesmo grupo, isto é, com o mesmo teor de areia. Neste caso, existe uma tendência das misturas a elevarem seus tempos de início de pega com o aumento do teor de aditivo superplastificante à base de policarboxilatos. Assim, fica caracterizado o retardo no tempo de pega das argamassas, mais expressivo na seqüência com a série com APV.

Nas misturas com o uso do aditivo promotor de viscosidade, conforme pode ser visto Tabela 22, observou-se que, com o aumento do aditivo superplastificante de base policarboxilatos, houve um retardamento do tempo de liberação do aumento da temperatura das argamassas, para todos os teores de APV testados, de acordo com a Figura 61. Esse comportamento mostra que o aditivo superplastificante de base policarboxilatos utilizado retarda a pega das misturas, independentemente das suas relações água/cimento. Ghezal (2003), em estudo realizado com promotor de viscosidade e policarboxilato, constatou o mesmo comportamento nas suas argamassas. Segundo ele, esse comportamento está atribuído às altas dosagens de policarboxilato.

Tabela 22 - Argamassas da série com APV e o tempo de início do aumento da temperatura.

Tipo	Teor de areia	Traços	% Aditivo Superpl.	Teores de APV (%)	a/c	t _{aumento temperatura} (h)
Argamassas com aditivo promotor de viscosidade (APV)	50% areia	100MV-2E2	0,15	0,2	0,65	8,67
		100MV-3D2	0,20	0,2	0,60	10,00
		100MV-4D2	0,25	0,2	0,60	11,00
		100MV-5D2	0,30	0,2	0,60	14,00
		100MV-2F3	0,15	0,3	0,70	8,67
		100MV-3E3	0,20	0,3	0,65	9,67
		100MV-4E3	0,25	0,3	0,65	11,00
		100MV-5D3	0,30	0,3	0,60	13,50
		100MV-3E4	0,20	0,4	0,65	9,67
		100MV-4E4	0,25	0,4	0,65	11,33
		100MV-5D4	0,30	0,4	0,60	13,17
		100MV-2G5	0,15	0,5	0,75	7,67
		100MV-4E5	0,25	0,5	0,65	11,83
		100MV-5E5	0,30	0,5	0,65	15,50
		100MV-3F6	0,20	0,6	0,70	5,83
		100MV-4E6	0,25	0,6	0,65	8,67
100MV-5F6	0,30	0,6	0,70	15,17		

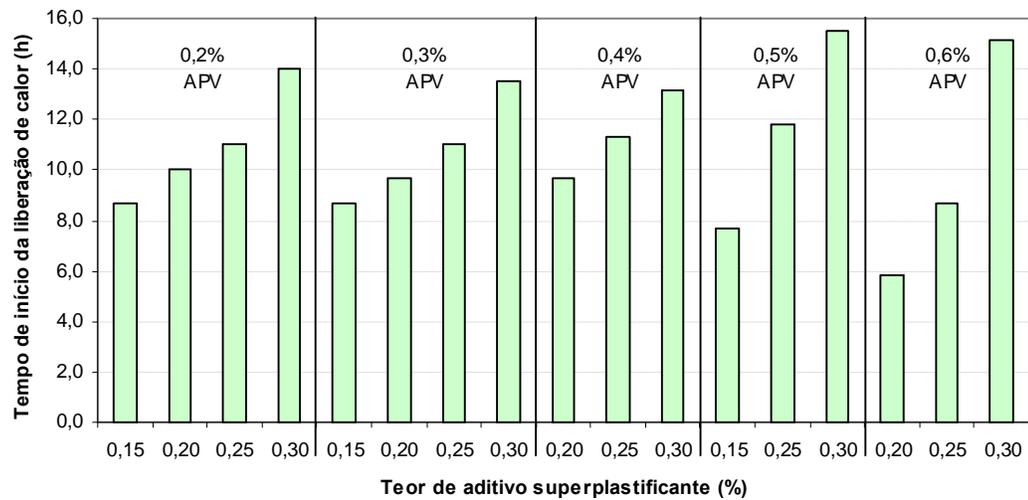


Figura 61 - Tempo de início da liberação de calor das argamassas com APV.

Para a série de APV em substituição ao filer, os tempos de início de pega foram elevados, assim como os das séries com 50 % de areia com filer e promotor, conforme Tabela 23. Isto ocorreu pelo fato de haver mais areia na mistura e teores de aditivo superplastificante mais elevados. Nem todas as argamassas apresentaram uma tendência em relação ao aditivo superplastificante como as anteriores.

Tabela 23 - Argamassas da série com APV e o tempo de início da evolução de temperatura.

Tipo	Teor de areia	Traços	Ad. Sup. (%)	APV (%)	a/c	t _{aumeto} temperatura (h)
Argamassas com aditivo promotor de viscosidade (APV)	50% areia e 75% cimento	75MV - 3H2	0,20	0,20	0,80	9,17
		75MV - 4G2	0,25	0,20	0,60	11,50
		75MV - 5F2	0,30	0,20	0,60	13,67
		75MV - 3H3	0,20	0,30	0,80	9,83
		75MV - 4H3	0,25	0,30	0,80	11,33
		75MV - 5G3	0,30	0,30	0,75	10,00
		75MV - 4H4	0,25	0,40	0,80	10,33
		75MV - 5H4	0,30	0,40	0,80	12,67
		75MV - 4H5	0,25	0,50	0,80	11,67
		75MV - 5H5	0,30	0,50	0,80	12,83
		75MV - 4H6	0,25	0,60	0,75	10,67
		75MV - 5H6	0,30	0,60	0,65	9,00

4.1.8 Resistência à compressão

Para se determinar a resistência à compressão das argamassas foram moldados quatro corpos-de-prova para cada argamassa que atendeu os critérios de auto-adensabilidade, sendo dois rompidos aos 7 dias e dois à idade de 28 dias. O maior resultado de cada par foi considerado para definir a resistência potencial. Os resultados de resistência potencial aos 7 e 28 dias são mostrados nas Tabela 24, Tabela 25 e Tabela 26. Para a série de 40 % de areia, para a mistura 55P – 3e, os corpos-de-prova não foram rompidos na idade de 7 dias, tendo 4 corpos-de-prova rompidos aos 28 dias.

Tabela 24 - Resultados da resistência à compressão das argamassas com filer.

Teor de areia	Argamassa com filer	Teor de filer (%)	Aditivo SP (%)	Relação a/c	fc7 dias (MPa)	fc28 dias (MPa)
40% areia	100P-1a	0	0,10	0,45	36,85	52,74
	75P-2c	25	0,15	0,55	29,01	34,28
	75P-3b	25	0,20	0,50	35,35	44,62
	65P-1e	35	0,10	0,65	22,49	31,53
	65P-2d	35	0,15	0,60	25,64	31,14
	65P-3c	35	0,20	0,55	31,86	41,71
	55P-2f	45	0,15	0,70	20,93	22,03
	55P-3e	45	0,20	0,65	*	32,14
	45P-3i	55	0,20	0,85	16,50	20,93
	45P-5g	55	0,30	0,75	20,02	28,90
45% areia	100P-1b	0	0,10	0,50	39,32	41,13
	100P-2a	0	0,15	0,45	37,64	44,82
	100P-3a	0	0,20	0,45	43,19	53,20
	75P-3d	25	0,20	0,60	26,28	37,38
	65P-2g	35	0,15	0,75	17,52	26,64
	55P-2i	45	0,15	0,85	17,27	20,04
	55P-3h	45	0,20	0,80	14,29	19,71
	55P-4g	45	0,25	0,75	19,35	23,17
50% areia	100P-2d	0	0,15	0,60	24,01	32,88
	100P-3d	0	0,20	0,60	25,03	35,65
	100P-5c	0	0,25	0,55	34,56	40,67
	100P-4c	0	0,30	0,55	34,53	44,13
	75P-3h	25	0,20	0,80	16,25	20,68
	75P-4f	25	0,25	0,70	19,61	26,20
	75P-5f	25	0,30	0,70	21,88	29,29
	65P-4i	35	0,25	0,85	15,10	20,25
	65P-5i	35	0,30	0,85	15,02	21,29

* Dado indisponível

Tabela 25 - Resultados da resistência à compressão das argamassas com APV.

Teor de areia	Argamassa com APV	Teor de APV (%)	Aditivo SP (%)	Relação a/c	fc7 dias (MPa)	fc28 dias (MPa)
50% areia	100MV-2E2	0,2	0,15	0,65	19,35	24,93
	100MV-3D2	0,2	0,20	0,60	24,93	30,05
	100MV-4D2	0,2	0,25	0,60	27,20	32,95
	100MV-5D2	0,2	0,30	0,60	30,48	36,42
	100MV-2F3	0,3	0,15	0,70	18,49	24,55
	100MV-3E3	0,3	0,20	0,65	23,73	25,64
	100MV-4E3	0,3	0,25	0,65	23,30	30,33
	100MV-5D3	0,3	0,30	0,60	26,23	35,63
	100MV-3E4	0,4	0,20	0,65	23,89	28,11
	100MV-4E4	0,4	0,25	0,65	23,40	28,78
	100MV-5D4	0,4	0,30	0,60	28,95	36,52
	100MV-2G5	0,5	0,15	0,75	18,34	22,36
	100MV-4E5	0,5	0,25	0,65	25,44	27,35
	100MV-5E5	0,5	0,30	0,65	21,24	31,65
	100MV-3F6	0,6	0,20	0,70	19,18	28,14
	100MV-4E6	0,6	0,25	0,65	24,50	29,95
100MV-5F6	0,6	0,30	0,70	21,98	30,41	

Tabela 26 - Resultados da resistência à compressão das argamassas com APV em substituição ao filer.

Teor de areia	Argamassa com APV	Teor de APV (%)	Aditivo SP (%)	Relação a/c	fc7 dias (MPa)	fc28 dias (MPa)
50% areia e 75% cimento	75MV-3H2	0,20	0,20	0,80	13,83	17,52
	75MV-4G2	0,20	0,25	0,60	15,89	22,54
	75MV-5F2	0,20	0,30	0,60	20,53	24,52
	75MV-3H3	0,30	0,20	0,80	15,56	18,90
	75MV-4H3	0,30	0,25	0,80	13,60	17,98
	75MV-5G3	0,30	0,30	0,75	13,52	22,56
	75MV-4H4	0,40	0,25	0,80	16,65	19,28
	75M -5H4	0,40	0,30	0,80	16,68	21,37
	75MV-4H5	0,50	0,25	0,80	15,38	19,89
	75MV-5H5	0,50	0,30	0,80	12,10	20,96
	75MV-4H6	0,60	0,25	0,75	15,15	19,07
	75MV-5H6	0,60	0,30	0,65	15,15	20,53

A partir desses valores, dispôs-se nas Figura 62, Figura 63, Figura 64, Figura 65 e Figura 66, a evolução das resistências das argamassas de cada grupo estudado.

As argamassas atenderam a faixa proposta de resistência usual, entre 20 e 45 MPa, exceto a série de APV em substituição a 25 % de filer, onde a resistência ficou entre 17,52 a 24,52 MPa.

Verificou-se, dessa forma, que a resistência cresce com o aumento da dosagem de superplastificante, para as argamassas com o mesmo teor de fíler ou de APV, e também para as mesmas relações a/c. Isso ocorre em função do efeito deste aditivo em deflocular as partículas de cimento e promover assim a otimização da hidratação do mesmo. Desse modo, com a maior formação dos produtos de hidratação pode-se ter, menos espaços vazios serão encontrados na estrutura da argamassa ou concreto, o que resulta num menor teor de vazios e maior densidade da argamassa no estado endurecido.

Observa-se também para cada grupo da série com fíler, com o aumento do teor de areia entre eles e o aumento do conteúdo de fíler a resistência diminuiu. A resistência diminui por estar diminuindo o teor de cimento na mistura. E nitidamente, com a diminuição da relação água/cimento, a resistência diminuiu. Além disso, à medida que se adiciona mais fíler à mistura, maior é a demanda de água, o que também contribui para a diminuição da resistência.

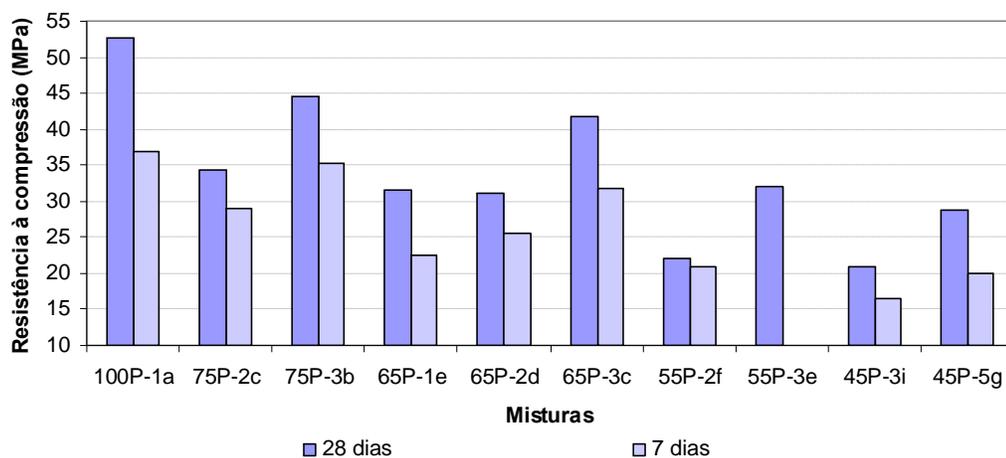


Figura 62 - Resistência à compressão das argamassas com fíler e 40 % areia.

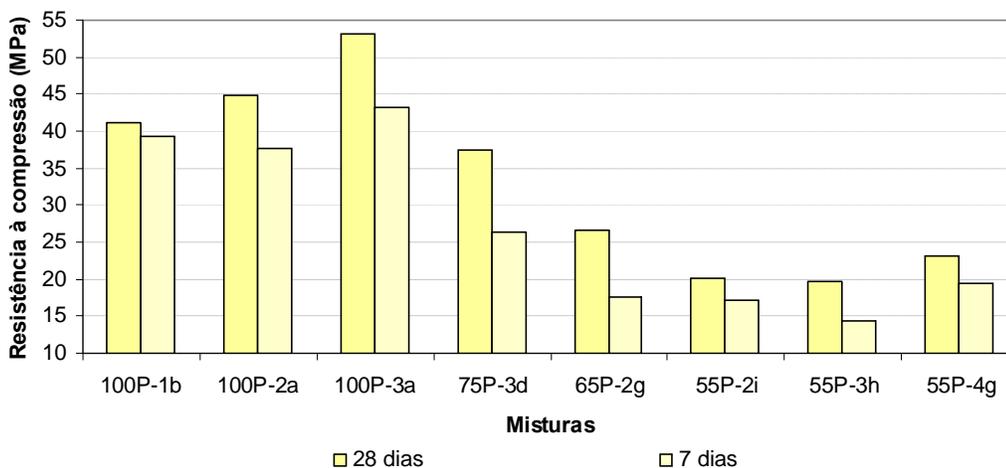


Figura 63 - Resistência à compressão das argamassas com fíler e 45 % areia.

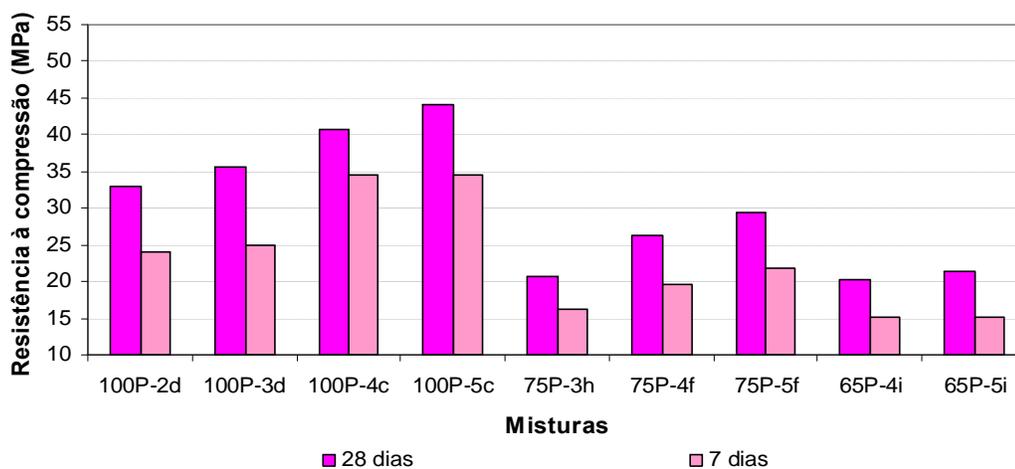


Figura 64 - Resistência à compressão das argamassas com filer e 50 % areia.

A série com aditivo promotor de viscosidade não demonstrou diferença significativa de resistência com o aumento do teor de APV, como mostra a Figura 65, pois o mesmo, por sua vez, não alterou expressivamente a relação água/cimento das misturas.

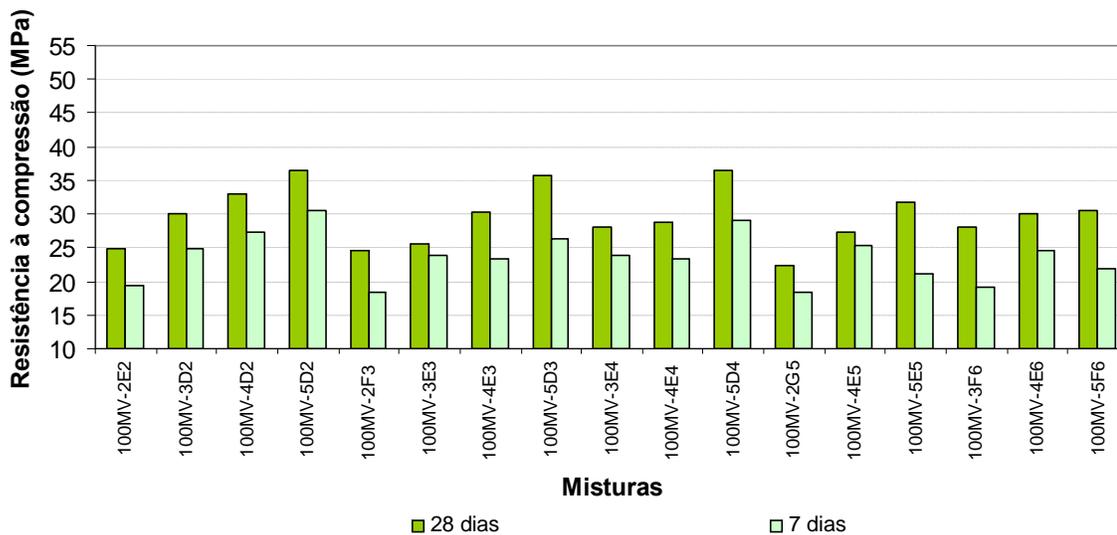


Figura 65 - Resistência à compressão das argamassas com APV e 50 % areia.

A série com APV em substituição ao filer, obteve resistências baixas, conforme Figura 66, o que se previa quando analisadas suas elevadas relações a/c e também a ausência de finos na mistura em 25 % do volume de cimento.

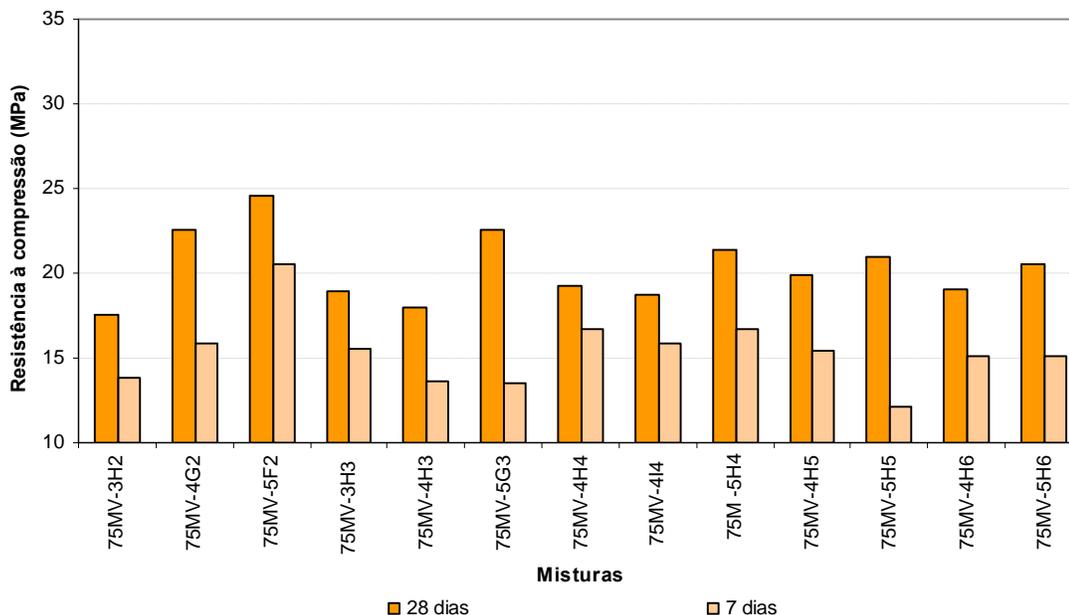


Figura 66 - Resistência à compressão das argamassas com APV em substituição ao filler.

4.1.8.1 Análise da superfície acabada das argamassas no estado endurecido

Através da análise visual no estado endurecido dos corpos-de-prova de argamassas observa-se que para todos os teores de areia, quando se tem o aumento do conteúdo de finos e de agregados, existe uma maior tendência à ocorrência de aprisionamento de ar na superfície acabada das argamassas. Isso pode estar relacionado ao aumento da viscosidade da argamassa que em decorrência disso, faz com que o ar incorporado no momento da mistura dos materiais, fique aprisionado à mesma.

Sendo assim, o grupo de argamassas com 40% de areia, apresentou melhores resultados em relação ao teor de vazios na superfície acabada. Isso se deve ao fato dessas argamassas possuírem maior quantidade de pastas. Ou também por estas serem mais densas, uma vez que, apresentaram menores relações água/cimento, o que contribui para uma menor quantidade de ar à mistura.

Nota-se que para as argamassas com teor de 45 % de areia, à medida que os teores de filler substituem o cimento até 45 %, à incorporação de ar parece aumentar gradativamente. Isso pode estar relacionado com o aumento da relação água/cimento, pois de acordo com Mehta e Monteiro (1994), na maioria dos casos, o fator água/cimento determina a porosidade da matriz da pasta de cimento

Esta porosidade deve estar relacionada com a diminuição do teor de pasta em consequência do aumento do teor de areia entre os grupos de argamassas com filer e também do aumento da relação água/cimento que deixa a mistura mais porosa.

Percebe-se que para este grupo de argamassas com 50 % de areia, o fator que coordenou a maior incorporação de ar nestes corpos-de-prova foi o aumento do teor de areia, pois todos parecem possuir a mesma aparência.

A série com aditivo promotor de viscosidade demonstrou, aparentemente, não possuir diferenças visuais significativas quanto ao aspecto da superfície acabada.

Esta série se mostrou pouco coesa durante sua confecção no estado fresco. Além disso, na maioria das misturas havia indícios de exsudação e segregação e também bolhinhas de ar estourando na superfície. Isso se verifica no seu acabamento no estado endurecido com relação aos vazios aparentes.

4.2 Estudo em concreto e suas correlações com as argamassas equivalentes

Dentre as argamassas do estudo fatorial que obtiveram resultados que atenderam aos critérios de Repette-Melo (2005) selecionaram-se alguns traços das séries com filer e das séries com promotor de viscosidade, a fim de se verificar o grau de equivalência com seus referidos concretos. Foram escolhidas argamassas de mesmo teor de areia e filer e relações água/cimento distintas, também com teores de filer e relações água/cimento diferentes para um mesmo teor de areia na argamassa. Buscou-se verificar a substituição do filer por APV e argamassas com diferentes a/c e teores de aditivo superplastificante, e diferentes teores de aditivo promotor de viscosidade. Esperava-se com isso, identificar as misturas que forneceram melhores proporcionamentos para a confecção dos CAAs e ainda assim atendessem a faixa de resistência de 20 a 45 MPa. Esta seleção está identificada em negrito nas Tabela 27 e Tabela 28, onde são mostradas as relações a/c das argamassas com relação aos teores de aditivo superplastificante, a porcentagem de cimento em função das substituições de filer e teores de APV.

Tabela 27 - Relações a/c das argamassas conformes com filer, 40% e 45% areia.

Argamassas com filer e 40%areia - a/c						Argamassas com filer e 45%areia - a/c					
Teores SP (%)	0,10	0,15	0,20	0,25	0,30	Teores SP (%)	0,10	0,15	0,20	0,25	0,30
100% cimento	0,45	x	x	x	x	100% cimento	0,50	0,45	0,45	x	x
75% cimento	x	0,55	0,50	x	x	75% cimento	x	x	0,60	x	x
65% cimento	0,65	0,60	0,55	x	x	65% cimento	x	0,75	x	x	x
55% cimento	x	0,70	0,65	x	x	55% cimento	x	0,85	0,80	0,75	x
45% cimento	x	x	0,85	x	0,75	45% cimento	x	x	x	x	x

Tabela 28 - Relações a/c das argamassas conformes com filer e 50% areia e com APV.

Argamassas com filer e 50% areia - a/c						Argamassas com APV e 50% areia - a/c					
Teores SP (%)	0,10	0,15	0,20	0,25	0,30	Teores SP (%)	0,10	0,15	0,20	0,25	0,30
100% cimento	x	0,60	0,60	0,55	0,55	0,2% MV	x	0,65	0,60	0,60	0,60
75% cimento	x	x	0,80	0,70	0,70	0,3% MV	x	0,70	0,65	0,65	0,60
65% cimento	x	x	x	0,85	0,85	0,4% MV	x	x	0,65	0,65	0,60
55% cimento	x	x	x	x	x	0,5% MV	x	0,75	x	0,65	0,65
45% cimento	x	x	x	x	x	0,6% MV	x	x	0,70	0,65	0,70

MV = Aditivo promotor de viscosidade

Nas argamassas com filer e teor de 40 % de areia, conforme visto na Tabela 27, tem como argamassas selecionadas as que tiveram uma substituição do cimento em 35 % do filer. Estas argamassas escolhidas tiveram o a/c de 0,65, 0,60 e 0,55 o que propiciou a confecção da diagrama de dosagem. Para o teor de 45 % de areia e 45 % de filer em substituição ao cimento, os a/c tiveram um incremento gradativo de 0,05, mas alcançaram nas argamassas valores de resistências muito próximas ao limite inferior especificado, sendo esperado que o seu desempenho ficasse aquém quando aplicado ao concreto. As demais séries apresentavam um único resultado de argamassa que se enquadrava nos critérios de Repette-Melo, com exceção da série com 100 % de cimento em que não se tinha a adição de filer. Baseada nesta constatação foi adotada a série em que a/c mais se aproximasse da faixa adotada para as argamassas com filer e 40 % de areia, para que assim pudesse ser verificada a influência de uma maior incorporação de areia na resistência. Foi então adotada a série com o teor de filer de 25 %, onde o a/c aplicado foi de 0,60.

Na Tabela 28 é apresentada as relações a/c para as argamassas conformes, em que o teor de areia foi de 50 %. O incremento de 0,05 na relação a/c para argamassas com o emprego de APV com teor de 0,3 % proporcionou a montagem da curva de dosagem, sendo desnecessário adotar duas misturas de concreto com o mesmo a/c de 0,65 (com teor de 0,20 e 0,25 de aditivo superplastificante) uma vez que a passagem de argamassa para o concreto incita a colocação de um teor de aditivo superplastificante além do previsto inicialmente na argamassa equivalente. A adoção de um teor de aditivo superplastificante em 0,25 % e uma relação a/c de 0,65 permitiu que fosse avaliada a influência do aditivo APV. Ainda analisando a mesma tabela para argamassas com filer e 50 % de areia, pode ser observado que as relações a/c tiveram um comportamento bastante uniforme dentro de uma mesma série, onde teor de aditivo apresentou uma pequena ou quase desprezível influência na variação da relação a/c.

Com base no que foi apresentado anteriormente buscou-se identificar todas as diferenças para se poder racionalizar o método de dosagem utilizado, e a adequação dos materiais característicos da região de Florianópolis empregados na dosagem do CAA. Na seqüência apresentam-se os fatores mais relevantes que influenciam as características do CAA, reportando-se às suas argamassas equivalentes para a efetivação da verificação.

4.2.1 Teor de agregado graúdo

Para a avaliação do teor de agregado graúdo incorporado nas argamassas, partiu-se de um teor equivalente a 28 % em volume, valor próximo ao teor mínimo recomendado pela literatura, com o intuito de incrementá-lo com a variação de 2 % até o máximo teor possível que garantisse a auto-compactabilidade do concreto. Porém, buscou-se encontrar um teor ideal para que pudesse ser adicionado este mesmo teor de agregado graúdo a todas as faixas dos teores de areia estudadas em argamassas, ou seja, para 40, 45 e 50 % de areia de volume na argamassa.

Para tanto, partiu-se de uma mistura com 50 % de areia, máximo teor de areia ensaiado, 25 % de filer e com uma relação a/c igual a 0,70. Desse modo, o teor que se enquadrasse para este caso, que representava um dos casos mais desfavoráveis, seria adequado às demais situações. No entanto, com o primeiro incremento realizado, verificado na Tabela 29, o espalhamento diminuiu 12 % , cerca de 8 cm do espalhamento da leitura inicial, o qual remeteu essa mistura a fornecer uma abertura inferior à mínima preconizada. Assim, adotou-se o teor ideal de 28 % de agregado graúdo para todos os concretos realizados.

Tabela 29 - Determinação do teor ideal de agregado graúdo.

Teor Brita Zero	Espalhamento (cm)
28%	64,8
30%	57,0

Na confecção dos CAAs, verificou-se que as argamassas com filer em substituição ao cimento para os teores de 25 e 35 % e admitindo um teor de 50 % de areia, demandaram teores elevados de aditivos superplastificante e apresentaram resistências mais baixas que as esperadas. Dessa maneira, não cumpriram todos os requisitos para a conformidade do CAA. Exceção foi à mistura que não se utilizou adição, ou seja, com 100 % de cimento, quando o teor de SP também se manteve alto, mas a resistência à compressão atingiu bom resultado.

4.2.2 Influência do equipamento de mistura

A variação dos resultados de espalhamento para uma mesma mistura produzida com 20 litros de concreto, por dois equipamentos distintos, é mostrada na Tabela 30. O misturador 1 é do tipo betoneira intermitente, de queda livre, eixo inclinado e pás contínuas solidárias a cuba, com capacidade de 120 l, e velocidade de 29 rpm. O misturador 2 é similar ao primeiro, porém com maior capacidade igual a 350 l e velocidade de 30 rpm, e possui maior energia de mistura e maior altura de queda, sendo neste caso, mais eficaz que o Misturador 1, resultando em misturas com maior espalhamento.

Tabela 30 - Influência do tipo de misturador no espalhamento do CAA.

Mistura: 75 %cimento, 25 % fíler, a/c 0,70 e 50 % areia arg. T = 25,2°C			
Misturador 1 (120 l)		Misturador 2 (350 l)	
Teor de SP (%)	Espalhamento (mm)	Teor de SP (%)	Espalhamento (mm)
0,350	52,0	0,350	58,7
0,025	52,0	0,025	62,0

4.2.3 Proporcionamento dos materiais

Seguindo o procedimento experimental, são apresentados os traços unitários e em volume e massa para um metro cúbico dos CAAs confeccionados no presente trabalho, conforme os dispostos nas Tabela 31, Tabela 32 e Tabela 33.

Tabela 31 - Traços unitários dos concretos auto-adensáveis em massa

Misturas	Cimento	Fíler	Areia média	Brita zero	a/c
C65P-1e	1	0,511	2,043	2,025	0,65
C65P-2d	1	0,534	2,043	2,025	0,60
C65P-3c	1	0,558	2,043	2,025	0,55
C100P-5c	1	0,000	2,554	2,025	0,55
C75P-5f	1	0,266	2,554	2,025	0,70
C75MV-5f2	1	0,266	2,556	2,025	0,70
C75P-5g*	1	0,255	2,554	2,025	0,75
C75MV-5g2	1	0,255	2,556	2,025	0,75
C65P-5i	1	0,362	2,554	2,025	0,85
C100MV-2F3	1	0,000	2,558	2,025	0,70
C100MV-3E3	1	0,000	2,558	2,025	0,65
C100MV-5D3	1	0,000	2,558	2,025	0,60
C100MV-4E4	1	0,000	2,559	2,025	0,65
C100MV-4E5	1	0,000	2,561	2,025	0,65
C75P-3D	1	0,322	2,299	2,025	0,60
C75MV-3D6	1	0,321	2,306	2,025	0,60

* Esta mistura equivale a C75P-5f com a/c = 0,75, a fim de assegurar melhores respostas de auto- compactabilidade do CAA.

Na confecção da mistura C75P-5f demandou um teor muito elevado de aditivo superplastificante, desta forma decidiu-se refazer a mesma mistura com uma relação a/c maior, passando de 0,70 para 0,75, resultando na mistura C75P-5g. E para estas duas misturas foram executados os concretos C75MV-5f2 e C75MV-5g2, os quais equivalem às misturas C75P-5f e C75P-5g com substituição de filer por APV. As misturas com APV em substituição não atenderam as propriedades reológicas de auto-compatibilidade para o CAA, logo foram desconsideradas da análise dos concretos.

Tabela 32 - Proporcionamento dos materiais constituintes dos CAAs, em volume.

Teor de Brita zero	Teores de Areia na Arg.	Concretos Confeccionados - Volume para 1 m ³								
		Traços	Quantidades (L/m ³)							
			C	Fíler	Areia média	Brita zero	SP	Água	Ad. APV	f _{C28max} (MPa)
28%	40%	C65P-1e	123,74	66,63	288,00	280,00	2,83	239,63	-	29,06
		C65P-2d	129,10	69,52	288,00	280,00	2,66	231,61	-	28,44
		C65P-3c	134,95	72,66	288,00	280,00	4,01	221,92	-	33,84
	50%	C100P-5c	134,73	0,00	360,00	280,00	5,24	221,56	-	33,36
		C75P-5f	103,82	34,61	360,00	280,00	4,28	217,29	-	16,70
		C75P-5g	99,91	33,30	360,00	280,00	4,11	224,04	-	19,25
		C65P-5i	87,65	47,19	360,00	280,00	3,80	222,75	-	19,53
	50%	C100MV-2F3	115,71	0,00	360,52	280,00	3,17	242,18	1,04	26,13
		C100MV-3E3	121,36	0,00	360,54	280,00	3,33	235,87	1,09	30,25
		C100MV-5D3	127,39	0,00	360,57	280,00	4,37	228,54	1,14	33,77
		C100MV-4E4	120,74	0,00	360,72	280,00	3,87	234,66	1,44	28,24
		C100MV-4E5	121,05	0,00	360,90	280,00	3,87	235,27	1,81	31,47
	45%	C75P-3D	125,61	41,87	324,00	280,00	3,17	225,35	-	31,07
		C75MV-3D6	140,41	0,00	325,13	280,00	3,16	251,89	2,50	33,79

C = cimento

As misturas de concreto foram identificadas tal quais as argamassas, mas para diferenciá-las foi colocada a letra “C” maiúscula indicando que estas séries foram feitas em concreto.

Tabela 33 - Proporcionamento dos materiais constituintes dos CAAs, em massa.

Teor de Brita zero	Teores de Areia na Arg.	Concretos Confeccionados - Massa para 1 m ³									
		Traços	Quantidades (kg/m ³)								
			C	Filer	Areia média	Brita zero	SP	Água	Ad. APV	f _{C28max} (MPa)	a/f
28%	40%	C65P-1e	369,26	188,86	754,56	747,60	3,077	239,63	-	29,06	1,18
		C65P-2d	385,48	197,16	754,56	747,60	2,891	231,61	-	28,44	1,10
		C65P-3c	402,62	205,92	754,56	747,60	4,362	221,92	-	33,84	1,01
	50%	C100P-5c	401,81	0,00	943,20	747,60	5,692	221,56	-	33,36	1,48
		C75P-5f	310,42	98,28	943,20	747,60	4,656	217,29	-	16,70	1,42
		C75P-5g	297,96	94,34	943,20	747,60	4,469	224,04	-	19,25	1,51
		C65P-5i	261,18	133,58	943,20	747,60	4,135	222,75	-	19,53	1,49
	50%	C100MV-2F3	344,95	0,00	944,56	747,60	3,450	242,18	1,04	26,13	1,85
		C100MV-3E3	362,31	0,00	944,62	747,60	3,623	235,87	1,09	30,25	1,73
		C100MV-5D3	379,97	0,00	944,69	747,60	4,750	228,54	1,14	33,77	1,60
		C100MV-4E4	361,02	0,00	945,09	747,60	4,212	234,66	1,44	28,24	1,73
		C100MV-4E5	360,84	0,00	945,56	747,60	4,210	235,27	1,81	31,47	1,73
	45%	C75P-3D	375,58	118,91	848,88	747,60	3,443	225,35	-	31,07	1,25
		C75MV-3D6	374,62	118,61	851,53	747,60	3,434	251,89	2,52	33,79	1,24

a/f – água/finos.

Confrontando-se estes resultados com a faixa apresentada na Tabela 3, no item 2.12.10, definida na literatura, observa-se que:

- O consumo de cimento foi inferior ao máximo estabelecido de 450 kg/m³.
- A relação água/finos para os concretos com 40 % areia na argamassa se manteve dentro da recomendação da literatura (1,20), e a série com 45 % de areia ficou muito próxima, com valores entre 1,24 e 1,25. Entretanto, para os demais concretos com 50% de areia na argamassa excederam o limite estabelecido devido ao aumento do conteúdo de areia e também das relações a/c, porém não sendo fator limitante para a obtenção de CAAs;
- O consumo de agregado miúdo inseriu-se dentro da faixa de 40 a 50 % de areia na argamassa. (OKAMURA, 1997; GOMES 2002; EFENARC, 2005 e DOMONE, 2005);
- O teor de agregado graúdo determinado em 28% permaneceu dentro da faixa estabelecida pela literatura. (EFENARC, 2005 e EFENARC, 2002).

O cumprimento destes parâmetros vem a comprovar que o procedimento utilizado para a dosagem permitiu o proporcionamento de CAAs com resultados técnicos e econômicos satisfatórios.

4.2.4 Teor de Aditivo Superplastificante

A fluidez do concreto auto-adensável depende essencialmente da interação dos materiais constituintes empregados bem como da compatibilidade entre os aditivos utilizados com os demais componentes da mistura.

Na Tabela 34 estão apresentados os resultados do CAA no estado fresco, verificando-se o cumprimento dos requisitos estabelecidos na literatura, dispostos no item 3.4.1, para a obtenção da auto-compactabilidade do CAA.

Tabela 34 - Teor de SP e os resultados dos ensaios de auto-compactabilidade do CAA.

Traços		SP arg. (%)	SP concr. (%)	Espalhamento dm (cm)	Funil -V t (s)	Caixa L H2/H1	Caixa U H (mm)
Fíler e 40% areia arg.	C65P-1e	0,100	0,250	67,8	3,22	0,83	330,0
	C65P-2d	0,150	0,225	69,0	3,31	0,89	338,0
	C65P-3c	0,200	0,325	68,3	5,29	0,85	328,0
Fíler e 50% areia arg.	C100P-5c	0,300	0,475	63,3	4,94	0,82	320,0
	C75P-5f	0,300	0,575	61,3	4,97	0,80	311,0
	C75P-5g	0,300	0,450	60,3	4,28	0,85	332,0
	C65P-5i	0,300	0,475	60,0	3,87	0,85	322,0
APV e 50% areia arg.	C100MV-2F3	0,150	0,325	61,3	3,41	0,80	317,0
	C100MV-3E3	0,200	0,350	61,8	4,56	0,82	300,0
	C100MV-5D3	0,300	0,375	61,5	4,38	0,85	310,0
	C100MV-4E4	0,250	0,350	64,0	3,75	0,83	323,0
	C100MV-4E5	0,250	0,350	61,8	4,97	0,81	300,0
Fíler e APV 45% areia arg.	C75P-3d	0,200	0,275	65,8	4,75	0,85	326,0
	C75MV-3d6	0,200	0,275	61,7	4,47	0,82	305,0

Com a adição do agregado graúdo à mistura, a interação dos materiais se modifica e o mesmo teor de aditivo encontrado na argamassa não pode ser transferido diretamente ao CAA. O teor de aditivo superplastificante obtido no estudo em argamassa necessita ser ajustado na fase concreto.

A previsibilidade da dosagem do aditivo superplastificante no CAA, tendo como ponto de partida o teor encontrado na argamassa, é um fator de constante busca conforme descrevem em diversos trabalhos analisados.

Os diversos teores de aditivos definidos para os CAAs estudados, são apresentados na Tabela 35, e para se ter uma melhor clareza das diferenças entre o teor na argamassa e o teor de superplastificante no concreto, estão ilustrados nas Figura 67, Figura 68, Figura 69 e Figura 70. O aditivo superplastificante é diretamente dependente do conteúdo de cimento, que

é variável nas misturas por causa dos diferentes teores de filer e areia. Desse modo, têm-se diversas respostas do aditivo superplastificante em função da composição da mistura.

Para a determinação do ajuste do aditivo superplastificante nos concretos, partiu-se inicialmente dos valores encontrados nas argamassas com um acréscimo mínimo de 0,05 % (MELO, 2005), mas como este acréscimo se mostrou inadequado para as misturas em decorrência da perda de fluidez causada pela perda de eficiência do aditivo superplastificante, pelo maior tempo decorrido em executar o concreto.

Essa demora na execução fazia com que tivessem seguidos ajustes nas misturas, principalmente com os mais altos teores de areia (50 %, por exemplo) e/ou com substituição de filer (35 %, por exemplo). Em alguns casos, a dosagem inicial do concreto foi feita com base na análise visual e experiência do executor que levou em conta a quantidade de cimento, filer, areia e relação a/c. Sendo esta dosagem do aditivo em concreto sempre maior do que o teor encontrado para a argamassa equivalente, partindo de um mínimo de 0,075 %, encontrado neste estudo.

Em relação ao teor de aditivo final encontrado para os concretos auto-adensáveis, dispostos na Tabela 35, averigua-se que os teores de aditivo superplastificantes tendem a aumentar com o incremento dos teores de areia, mantendo-se a correlação estabelecida na argamassa.

De acordo com a Tabela 35, os teores de aditivo superplastificante foram muito elevados para as misturas com 50% de areia 25 e 35 % de filer, pois esta série não apresentou uma boa correlação com suas argamassas equivalentes. Além da dificuldade destas misturas de concreto em atender os requisitos pré-estabelecidos de auto-compactabilidade, pois mesmo aplicando reajustes seguidos, o espalhamento da mistura permanecia praticamente constante, demandando muito aditivo. Cabe ressaltar que no estado endurecido as suas resistências à compressão foram menores que o limite mínimo esperado de 20 MPa, caracterizando assim, que o teor de 50 % de areia empregado na argamassa se mostra excessivo.

Analisando-se a Tabela 35, percebe-se que o ajuste mínimo de aditivo empregado nos CAAs foi da ordem de 0,075 % do teor de sólidos em relação da massa de cimento, em relação ao teor encontrado na fase de argamassa.

Tabela 35 - Teores de superplastificantes encontrados nos CAAs e suas relações com os teores das argamassas.

Traços		%SP - argamassa	%SP inicial concreto	%SP final concreto	Diferença %SP	Relação arg.xconcr.	a/c
40% areia	C65P-1e	0,10	0,175	0,250	0,150	2,50	0,65
	C65P-2d	0,15	0,200	0,225	0,075	1,50	0,60
	C65P-3c	0,20	0,275	0,325	0,125	1,63	0,55
50% areia	C100P-5c	0,30	0,425	0,475	0,175	1,58	0,55
	C75P-5g	0,30	0,400	0,450	0,150	1,50	0,75
	C65P-5i	0,30	0,450	0,475	0,175	1,58	0,85
50% areia	C100MV-2F3	0,15	0,275	0,325	0,175	2,17	0,70
	C100MV-3E3	0,20	0,300	0,350	0,150	1,75	0,65
	C100MV-5D3	0,30	0,375	0,375	0,075	1,25	0,60
	C100MV-4E4	0,25	0,350	0,350	0,100	1,40	0,65
	C100MV-4E5	0,25	0,350	0,350	0,100	1,40	0,65
45% areia	C75P-3D	0,20	0,275	0,275	0,075	1,38	0,60
	C75MV-3D6	0,20	0,275	0,275	0,075	1,38	0,60

Para a série com APV, de acordo com a Figura 67, a diferença do teor de aditivo SP ajustado no CAA, decresce com o aumento da relação a/c, pois o maior conteúdo de água na mistura contribui para a lubrificação dos grãos, interagindo com o aditivo.

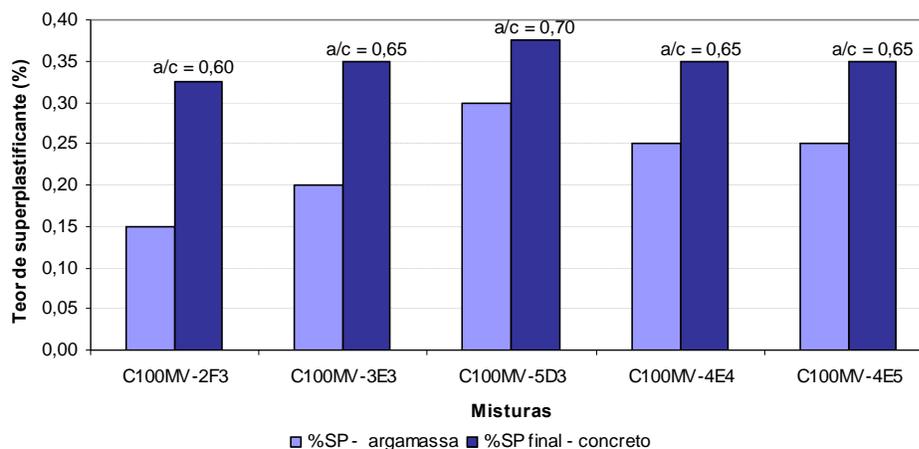


Figura 67 - Diferença do teor de SP na argamassa e no CAA com APV.

A série de 40 % de areia na argamassa não consumiu tanto aditivo superplastificante quanto as séries de 50 % de areia, por apresentar maior quantidade de pasta em sua composição, a qual promove maior eficiência do aditivo. Estes teores podem ser verificados na Figura 68.

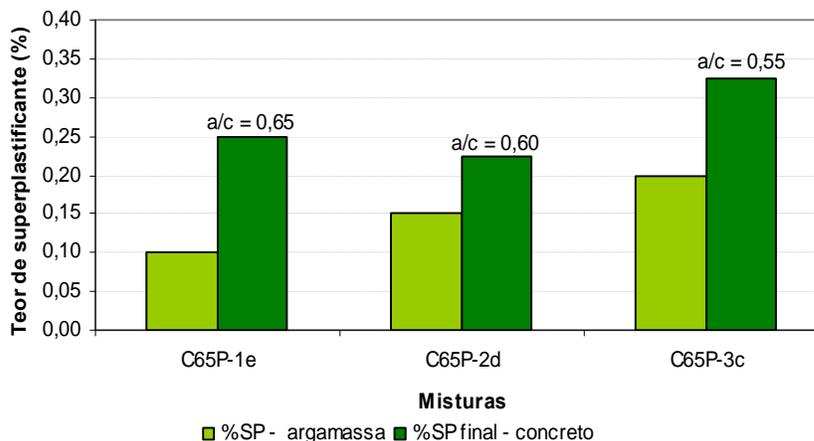


Figura 68 - Diferença do teor de SP na argamassa e no CAA com filer e 40% areia.

Na Figura 69, mostra-se que o grupo de CAAs confeccionados com 50% de areia na argamassa e com a utilização de filer consumiram elevados teores de aditivos para atenderem aos critérios prescritos. Isso foi um indicativo de que as misturas não obtiveram adequação satisfatória aos requisitos dos ensaios.

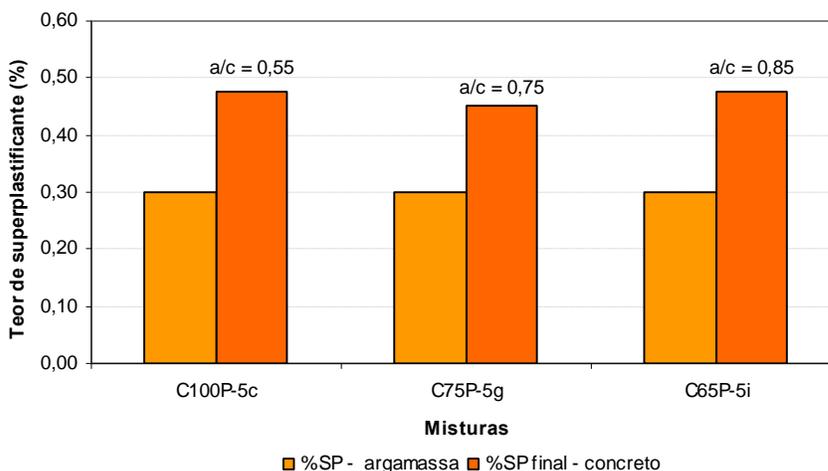


Figura 69 - Diferença do teor de SP na argamassa e no CAA com filer e 50% areia.

Para o grupo com filer e 45 % de areia na argamassa, não se pode observar a tendência do teor de aditivo por se dispor de somente um resultado. O que se pode verificar na Figura 70 é que foi possível confeccionar o concreto partindo-se da argamassa equivalente, assim como conseguiu-se substituir o conteúdo de 25 % de filer, por 0,6% de APV, variando-se muito pouco as características tanto no estado fresco quanto no endurecido.

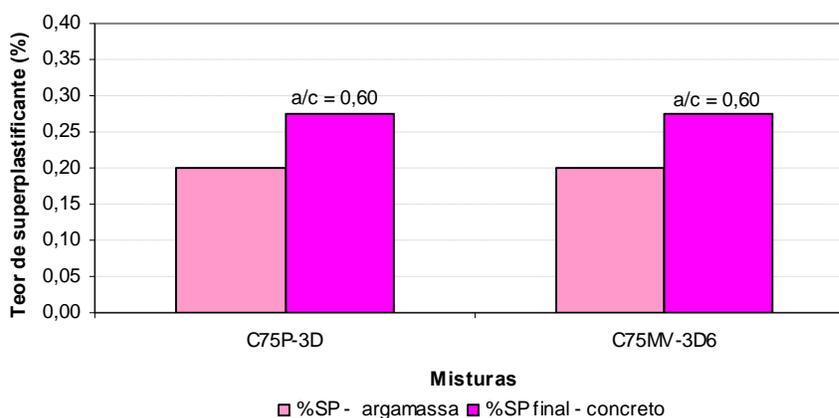


Figura 70 - Diferença do teor de SP na argamassa e no CAA com fíler e 45% areia e a substituição por APV.

A partir dos resultados obtidos não foi possível estabelecer uma correlação dos teores de aditivo superplastificante utilizados nas argamassas com os teores obtidos na confecção nos concreto, pois os resultados não apresentaram nenhuma tendência de comportamento para tal aproximação. Este é um aspecto que ainda deve ser objeto de estudo, buscando-se assim aprimorar o método de dosagem.

4.2.5 Influência do modo de ajuste do CAA

Com o intuito de demonstrar as diferenças no comportamento do CAA, decorrentes do teor inicial e reajustes de aditivo superplastificante empregados para a obtenção do mesmo, três traços foram submetidos à variadas formas de adição de superplastificante. De acordo com a Tabela 36, pode-se averiguar que, a resposta do CAA às variadas dosagens iniciais e a diferentes reajustes é fator determinante para que o mesmo apresente conformidade com os ensaios, Sendo a caixa-L e o espalhamento os ensaios mais precisos para a determinação destes incrementos de aditivos, visto que, o ensaio do funil-V não mostra muita sensibilidade.

Uma forma interessante de reajuste, ocorre para a mistura C65P-3d, onde o teor de aditivo final da mistura foi idêntico para as duas seqüências, 1A e 1B, conforme Tabela 36. Porém, quando o teor de aditivo final encontrado é adicionado à mistura de forma única, obtendo um teor inicial mais elevado, este se mostra mais eficiente do que quando adicionada à mesma quantidade de aditivo, mas de forma gradual, ou seja, com reajustes.

Essa diferença de comportamento refere-se, supostamente, ao fato de que com a maior dosagem inicial de ajuste do CAA, a quantidade de aditivo presente na mistura permite total adsorção do aditivo às partículas de cimento e também fornece uma parcela remanescente que auxilia para uma maior repulsão entre os grãos de cimento. Logo, essas cadeias livres de

polícarboxilatos que se encontram na mistura, entre as cadeias adsorvidas pelas partículas de cimento, provocam uma repulsão adicional entre estas partículas, afastando-as mais ainda umas das outras, e aumentando a fluidez da mistura.

Diante do que foi exposto, constata-se que os modos de adicionar o teor inicial e os reajustes influenciam significativamente no resultados dos ensaios para o CAA. Nas misturas de concreto deve-se partir de um teor inicial mais elevado do que o conseguido na argamassa equivalente, considerando não somente o teor de aditivo da argamassa, mas ponderando-se com uma avaliação subjetiva os teores: de areia, de fíler, de cimento e a relação a/c.

Tabela 36 - Diferentes formas de se ajustar e reajustar o CAA.

Ajustes e reajustes diferentes			
Misturas	Teor de SP (%)	dm (cm)	t (s)
75P-5F: 75% cimento, 25% fíler, a/c 0,70 e 50% areia na argamassa			
1A	0,300	59,0	-
	0,025	59,5	-
	0,050	64,8	-
1B	0,350	58,7	-
	0,025	62,0	-
1C	0,375	61,0	4,07
	0,025	53,3	4,85
	0,025	42,0	5,97
	0,025	40,3	15,62
1D	0,375	60,0	4,93
	0,050	60,2	4,08
	0,050	60,7	3,75
1E	0,450	63,8	-
	0,075	61,3	4,97
C65P-1e: 65% cimento, 35% fíler, a/c 0,65 e 40% areia na argamassa			
1A	0,175	54,3	-
	0,025	61,67	-
	0,050	67,8	3,22
1B	0,250	76,2	3,34
C65P-3d: 65% cimento, 35% fíler, a/c 0,55 e 40% areia na argamassa			
1A	0,275	60,7	-
	0,025	60,0	-
	0,025	68,3	5,29
1B	0,250	60,3	-
	0,025	57,7	-
	0,075	79,7	-

Em princípio o reajuste parcial pode ser mais econômico. No entanto, quando o teor de aditivo determinado na argamassa equivalente está muito aquém do teor ideal para o concreto, a forma de reajuste parcial faz com que o aditivo seja desperdiçado com a falta de manutenção da fluidez da mistura, principalmente quando os incrementos de reajustes são

muito pequenos e necessita-se de vários reajustes. Então, este teor inicial mais elevado, por vez, pode não ser a mistura mais econômica, mas opta-se por usar uma dosagem com um excedente de aditivo para que se tenha a ensaios mais objetivos e manutenção da fluidez quando da sua aplicação na prática.

4.2.6 Teor de Aditivo Promotor de Viscosidade

Os resultados apresentados na Tabela 37, com relação à variação do teor de APV utilizado nos concretos, constatou-se que se mantendo um teor de 0,30 % da massa de cimento, para diferentes relações água/cimento e mesmo teor de SP, o teor de APV não influenciou nas resistências obtidas. Entretanto, para teores de APV iguais a 0,3; 0,4 e 0,5 %, mantidas as relações a/c e com os mesmos teores de superplastificante, as resistências encontradas e suas características de auto-compactabilidade não foram diferentes entre si. Nestes termos, o teor de APV não influenciou significativamente as propriedades do CAA.

Tabela 37 - Características das misturas com aditivo promotor de viscosidade

Traços		% APV	%SP – arg.	%SP final concreto	Relação arg. x concr.	a/c	f_{c28max} (MPa)	dm (cm)	t (s)
50% areia	C100MV-2F3	0,30	0,15	0,325	2,17	0,70	26,13	61,3	3,41
	C100MV-3E3	0,30	0,20	0,350	1,75	0,65	30,25	61,8	4,56
	C100MV-5D3	0,30	0,30	0,375	1,25	0,60	33,77	61,5	4,38
	C100MV-4E4	0,40	0,25	0,350	1,40	0,65	28,24	64,0	3,75
	C100MV-4E5	0,50	0,25	0,350	1,40	0,65	31,47	61,8	4,97

4.2.7 Teor de Fíler

De acordo com a conformidade dos traços de concreto adaptados aos critérios de Repette-Melo, como visto na Tabela 38, pôde-se constatar que a equivalência foi estabelecida para as misturas de CAA para a série de 40 % areia na argamassa, onde foram avaliadas três misturas de concreto com substituição volumétrica de 35 % de filer ao cimento e também para a dosagem de concreto com teor de 45 % areia e 25 % de filer. Sendo que estes resultados atenderam aos requisitos pré-estabelecidos tanto de auto-compactabilidade como de resistência à compressão. Para os concretos analisados para a série de 50% areia e com os teores de filer de 25 e 35 %, a correlação entre argamassa e concreto não pode ser considerada, mesmo que as misturas de concreto apresentassem conformidade quanto aos quesitos de auto-compactabilidade no estado fresco, o mesmo não ocorreu para o estado

endurecido, inviabilizando assim, essa dosagem para estes CAAs. Os valores destas resistências foram de encontro com suas relações a/c, impossibilitando de tal modo, suas correlações.

Tabela 38 - Características das misturas com filer calcário.

Traços		Teor de Filer (%)	SP concreto (%)	dm (cm)	t (s)	H2/H1	f _{C28max} argamassa (MPa)	f _{C28max} concreto (MPa)	a/c
Filer e 40% areia arg.	C65P-1e	35	0,250	67,8	3,22	0,83	31,53	29,06	0,65
	C65P-2d	35	0,225	69,0	3,31	0,89	31,14	28,44	0,60
	C65P-3c	35	0,325	68,3	5,29	0,85	41,71	33,84	0,55
Filer e 50% areia arg.	C75P-5f	25	0,575	61,3	4,97	0,80	29,29	16,70	0,70
	C75P-5g	25	0,450	60,3	4,28	0,85	*	19,53	0,75
	C65P-5i	35	0,475	60,0	3,87	0,85	21,29	19,25	0,85
Filer e 45% areia arg.	C75P-3d	25	0,275	65,8	4,75	0,85	37,38	31,07	0,60

* Resultado não disponível

4.2.8 Massa específica e teor de vazios

A Tabela 39 mostra as massas específicas dos concretos executados e seus teores de vazios obtidos teoricamente, os valores dos teores de vazios dos concretos e argamassas permaneceram dentro de uma faixa que vai de 4 a 10 %, como pode ser verificado na Figura 71. Exceto para a mistura C75P-5g que apresentou 15 % de vazios, este valor deve estar atribuído ao erro de leitura do peso deste concreto, podendo ser do operador ou do equipamento. No entanto alguns valores ficaram acima dos 7 % (limite superior da faixa recomendada por Okamura). Esse aumento do teor de vazios pode estar associado à faixa de a/c, encontrada neste trabalho, ser mais elevada que as utilizadas usualmente na literatura.

Analisando a Figura 71, percebe-se que os teores de vazios foram maiores nos concretos com filer do que nas suas argamassas equivalentes. Isso pode ser devido ao tipo de misturador, que no concreto foi usado o do tipo de queda, e para a argamassa de eixo vertical. O misturado do tipo de queda favorece o aprisionamento do ar, tendo em vista que essas misturas possuem filer, o qual as deixa mais coesas, impedindo a saída do ar incorporado.

Para as 6 misturas com APV foi observado que quatro delas apresentaram um comportamento fora do esperado. Uma vez que, as argamassas equivalentes alcançaram teores de vazios mais elevados do que os respectivos concretos. Essa incorporação indesejada de ar pode ter sido ocasionada pelo tipo do misturador ou energia de mistura e teor de aditivo.

Tabela 39 - Massa específica e teor de vazios dos concretos executados.

Traços	γ (Kg/dm ³)	a/c	SP final concreto (%)	f_{c28max} concreto (MPa)	% Vazios concreto
C65P-1e	2,1390	0,65	0,250	29,06	7,18
C65P-2d	2,0913	0,60	0,225	28,44	9,81
C65P-3c	2,1104	0,55	0,325	33,84	9,65
C100P-5c	2,1263	0,55	0,475	33,36	8,29
C75P-5f	2,1263	0,70	0,450	16,70	8,41
C75P-5g	1,9449	0,75	0,475	19,25	15,82
C65P-5i	2,0817	0,85	0,325	19,53	9,94
C100MV-2F3	2,0786	0,70	0,350	26,13	8,89
C100MV-3E3	2,1613	0,65	0,375	30,25	5,75
C100MV-5D3	2,1168	0,60	0,350	33,77	8,17
C100MV-4E4	2,1422	0,65	0,350	28,24	6,56
C100MV-4E5	2,2154	0,65	0,275	31,47	3,37
C75P-3D	2,1518	0,60	0,275	31,07	7,24
C75MV-3D6	2,1390	0,60	0,250	33,79	7,82
C65P-1e ad.+	2,1995	0,65	0,225	26,13	4,55

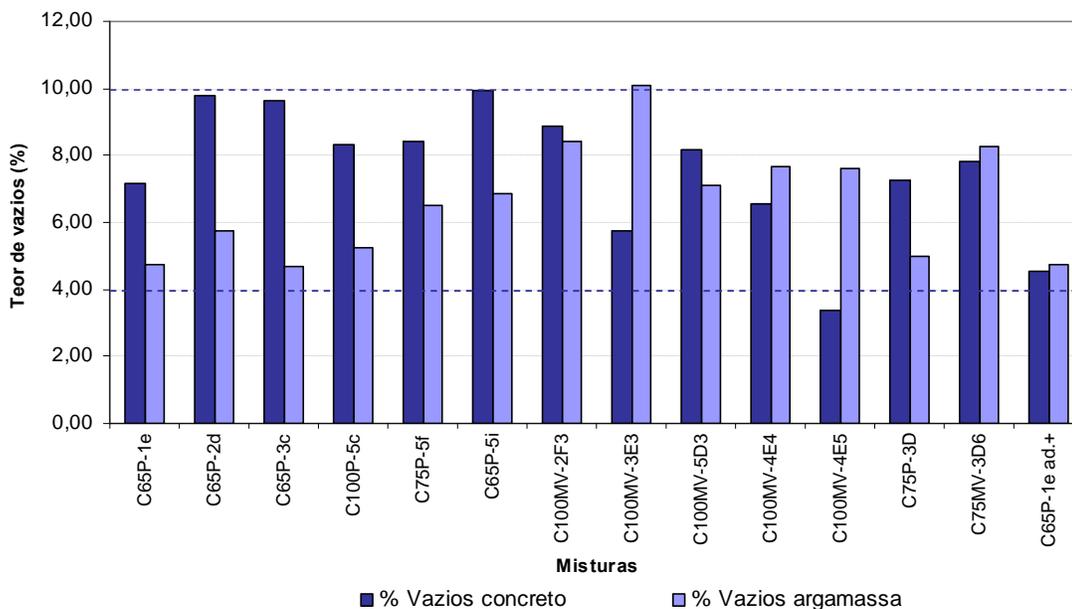


Figura 71 - Teor de vazios das argamassas e concretos equivalentes.

Ao analisar as Figura 71 e Figura 72 observa uma tendência que corrobora com a literatura, em que o aumento de teor de ar incorporado reduz a resistência do concreto, por estar diminuindo a capacidade portante da mistura. Por exemplo, o concreto C65P – 1e e C65P – 1ead+, que são praticamente a mesma mistura, no entanto, com incorporação de ar de aproximadamente 7 e 4 % , chegando a reduzir quase 5 MPa da resistência do C65P – 1e ad+.

4.2.9 Resistência à compressão

As resistências dos concretos e de suas argamassas equivalentes estão dispostas na Figura 72. Nota-se que para a maioria das misturas, as resistências das argamassas equivalentes e dos seus concretos atingiram valores bastante próximos do que se era esperado. Para as misturas com APV, constata-se que as resistências dos concretos são sutilmente mais elevadas que as suas respectivas argamassas para quatro misturas, o que deve corresponder ao maior teor de aditivo superplastificante utilizado nesses concretos.

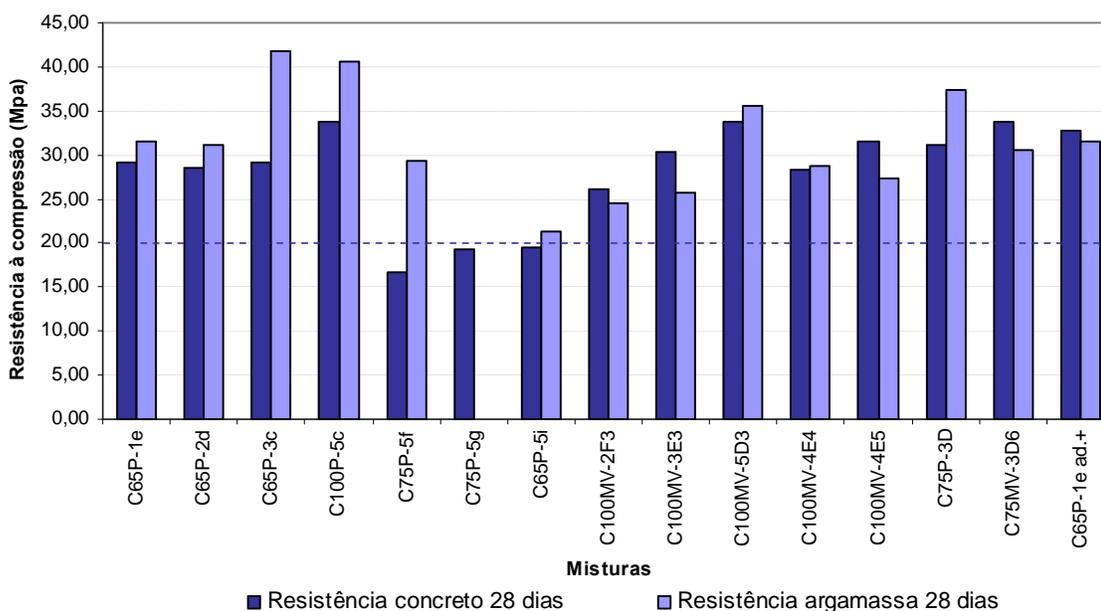


Figura 72 - Resistência à compressão dos CAAs e suas respectivas argamassas.

Os concretos pertencentes ao grupo de filer e 50 % areia, obtiveram resistências mais baixas que o valor limite inferior prescrito por norma, no caso, inferiores a 20 MPa. Os quais inviabilizaram estas misturas, que correspondem a C75P-5f; C75P-5g e C65P-5i, para os tipos de materiais empregados no presente trabalho, restando somente à mistura com 100 % de cimento, com boa resistência. Isso está relacionado com a diminuição do conteúdo de cimento pela substituição do filer, para um grupo com teor de areia elevado na argamassa, o que acabou por elevar a relação a/c comprometendo a resistência.

Na mistura C75P-5g sua argamassa equivalente não dispõe de todos os dados de ensaio pertinentes a este trabalho, pois este concreto equivalente foi acrescentado ao estudo, mediante a análise de resultado do C75P-5f e sua argamassa foi confeccionada apenas para conferir se atendia os critérios no estado fresco.

4.2.9.1 Análise da superfície acabada dos corpos de prova

Observando-se a superfície acabada dos concretos, alguns corpos-de-prova apresentaram uma incorporação de ar mais elevada na sua superfície acabada, principalmente, aquelas misturas da série com filer e 50 % de areia, as quais não atingiram a resistência mínima requerida. Em todos os grupos estudados existiram misturas que apresentaram boas superfícies acabadas, assim como também outras tiveram menos propensão à liberação do ar incorporado no processo de confecção, visto que, alguns dos teores de vazios se pronunciaram mais elevados que 7%, teor máximo estabelecido pela literatura.

4.2.10 Segregação

A segregação foi analisada através da análise visual dos corpos-de-prova no estado endurecido, sendo que os corpos-de-prova não demonstraram indícios de segregação, isto é, apresentaram homogeneidade em toda sua extensão. As Figura 73 e Figura 74 mostram dois corpos-de-prova com filer e com APV para fins de exemplificação.



Figura 73 - Concreto rompido com filer e 40% de areia na argamassa.



Figura 74 - Concreto rompido com APV e 50% de areia na argamassa.

4.2.11 Módulo de elasticidade

Para o cálculo do módulo de elasticidade a norma NBR 6118:2004 considera em sua aplicação o módulo de deformação tangente inicial cordal a 30 % f_c , (ou outra tensão especificada em projeto) sendo obtido segundo o ensaio descrito na NBR 8522:2003. Esta condição de cálculo foi aplicada neste trabalho para o cálculo do módulo de elasticidade experimental. A norma NBR 6118:2004 também prescreve para os casos em que não forem feitos ensaios e não existirem dados mais precisos sobre o concreto usado na idade de 28 dias, pode-se estimar o valor do módulo de elasticidade usando a equação 8:

$$E_{ci} = 5600 f_{ck}^{1/2} \text{ (MPa)} \quad (8)$$

O módulo estimado por esta equação foi usado como valor comparativo para confrontar com os resultados experimentais e foi constatado, conforme observado na Tabela 40 que o módulo de elasticidade tende a sofrer uma redução, pois é bastante influenciado pelo módulo de elasticidade de cada material, especialmente dos agregados. Esse decréscimo pode indicar que a equação é questionável para avaliação do módulo de elasticidade de CAA, tendo em vista que nestes concretos o teor de agregado é menor do que o usualmente empregado nos concretos convencionais.

Tabela 40 - Resultados de módulo de elasticidade experimental e estimado (NBR 6118:2004).

Mistura	Módulo de Elasticidade (GPa)	
	Experimental	NBR 6118
C65P-1e	22,15	30,19
C65P-2d	21,07	29,87
C65P-3c	26,91	32,57
C100P-5c	25,66	32,34
C75P-5f	20,87	22,89
C75P-5g	16,08	24,57
C65P-5i	21,70	24,75
C100MV-2F3	21,81	28,62
C100MV-3E3	24,85	30,80
C100MV-5D3	23,97	32,54
C100MV-4E4	21,72	29,76
C100MV-4E5	23,54	31,42
C75P-3D	24,12	31,21
C75MV-3D6	24,17	32,55
C65p-1e ad.+	24,08	32,06

4.2.12 Diagrama de dosagem

Com os valores disponíveis através da confecção de argamassas e concretos obtidos através do método Repette-Melo estabeleceram-se diagramas de dosagem.

Para a idealização destas curvas de dosagens é necessário que se tenham no mínimo três pontos com diferentes relações a/c. Obedecidas estas condições, para o estudo em questão, foi possível traçar duas curvas de dosagem, uma para argamassas com 40 % de areia e 35 % de filer e outra para argamassas com 50 % de areia e 0,30 % de aditivo promotor de viscosidade, ambas com a utilização de aditivo superplastificante.

Pretender-se-ia obter com o estudo fatorial adotado, vários diagramas de dosagem, para os três diferentes teores de areia e seus diferentes teores estudados de filer e promotor de viscosidade. Porém, muitas argamassas não alcançaram os requisitos necessários para serem consideradas auto-adensáveis. Dentre as argamassas selecionadas para a execução dos concretos, para aquelas com filer e o maior teor de areia, seus respectivos concretos não alcançaram as resistências mínimas estabelecidas neste estudo (20 MPa), e não puderam ser adotados. Já para outros grupos não foi possível reunir um mínimo de três concretos, inviabilizando a confecção dos diagramas de dosagem. As curvas estão apresentadas nas Figura 75 e Figura 76. Com a utilização destas curvas é possível de obter a dosagem de um concreto dada a resistência requerida, fator a/c ou consumo de cimento desejado.

Através dos dados de resistência à compressão e relação água/cimento aplicou-se uma análise de regressão linear ajustando-os à Lei de Abrams para o CAA e obtiveram-se as equações que definiram o comportamento das curvas apresentadas. A equação 9, com R^2 de 0,91; e a equação 10, com R^2 de 0,95; mostram a lei de Abrams para um CAA com 40 % de areia na argamassa e 35 % de filer e para concreto auto-adensável com 0,30 % de aditivo promotor de viscosidade, respectivamente, ambos com materiais da região da Grande Florianópolis.

$$f_{cj} = \frac{75,69}{4,58^{a/c}} \quad (9)$$

$$f_{cj} = \frac{158,31}{13,00^{a/c}} \quad (10)$$

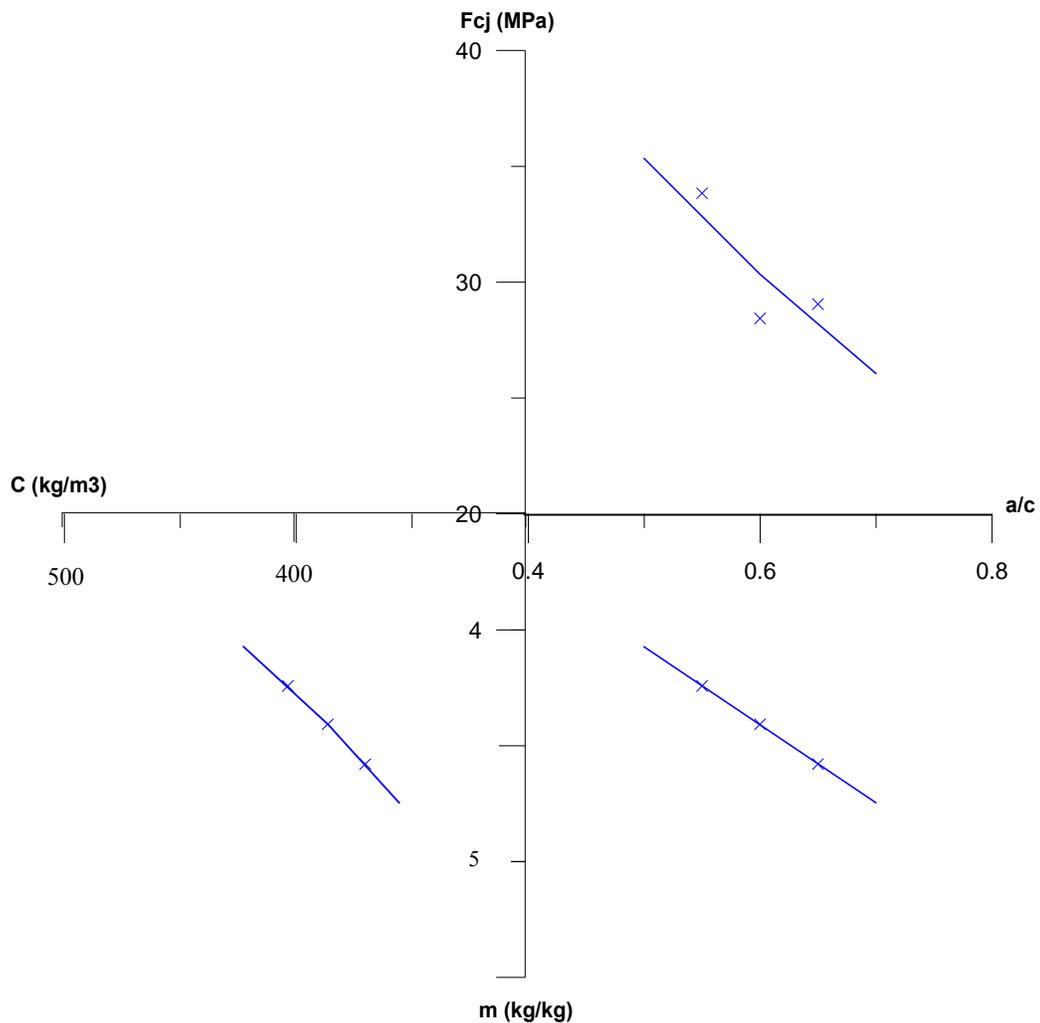


Figura 75 - Diagrama de dosagem para CAA com 35 % de filer e 40 % de areia na argamassa.

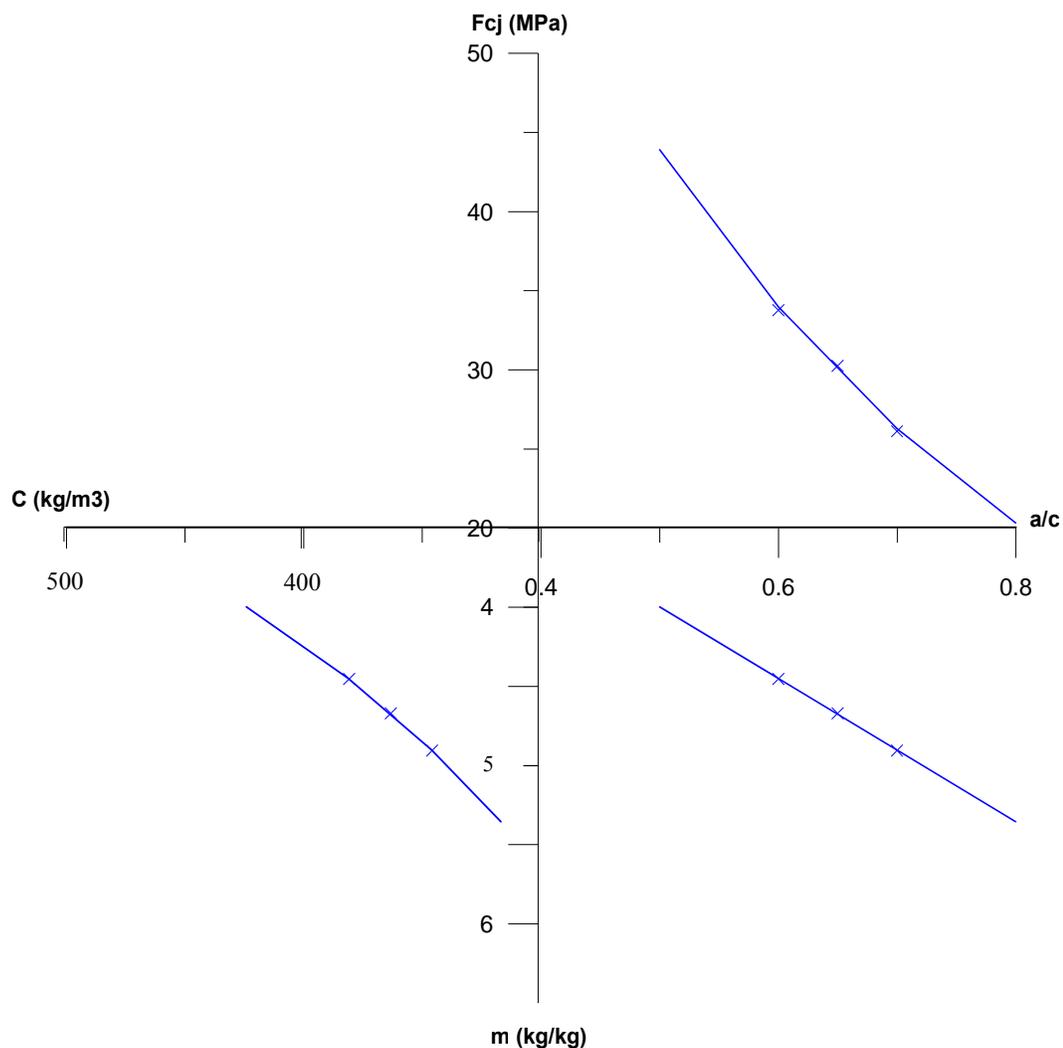


Figura 76 - Diagrama de dosagem para CAA com 0,30 % de APV e 50 % areia na argamassa.

A Figura 77 apresenta os teores de aditivos superplastificante das misturas utilizadas para a confecção dos diagramas, em função das suas relações a/c . Esperava-se que o aditivo tivesse um comportamento linear em função da relação a/c , porém isto não foi constatado para as misturas com 40 % de areia na argamassa e 35 % de fíler. A presença do fíler pode ser um fator gerador de variabilidade nas dosagens no ajuste do aditivo superplastificante do concreto, embora esse comportamento não fosse estabelecido na fase do estudo em argamassa.

Já para as outras misturas de CAA com 0,3 % de aditivo promotor de viscosidade apresentou previsibilidade em sua dosagem para as diferentes relações a/c. Atribui-se esse comportamento ao procedimento de mistura, em que se adicionava teores maiores para dosagem iniciais, do que os atingidos para argamassa, uma vez que o operador já tinha adquirido experiência com relação ao ajustes de dosagem do aditivo superplastificante para alcançar a faixa de resultado dos ensaios.

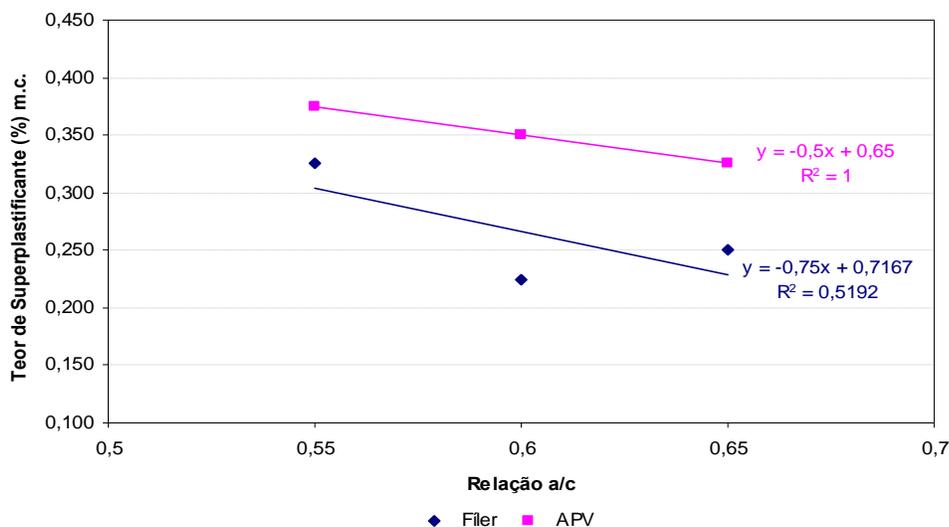


Figura 77 - Teor de superplastificante otimizado para misturas com filer e APV.

4.2.13 Sugestões para a Complementação do Método Repette-Melo

Com base nos resultados do estudo fatorial em argamassas, sugere-se complementar o método Repette-Melo, a fim de racionalizá-lo e propor a ampliação do seu escopo para o emprego do aditivo promotor de viscosidade com cimento CPV ARI - RS.

As Figura 78 e Figura 79, apresentam o fluxograma que mostra a racionalização do método que parte da confecção de argamassas auto-adensáveis, onde serão ajustados, nesta fase, os teores de filer que se deseja substituir ao conteúdo de cimento e os teores de superplastificante que atendam os requisitos dos ensaios de espalhamento e funil-V para a obtenção da fluidez da argamassa.

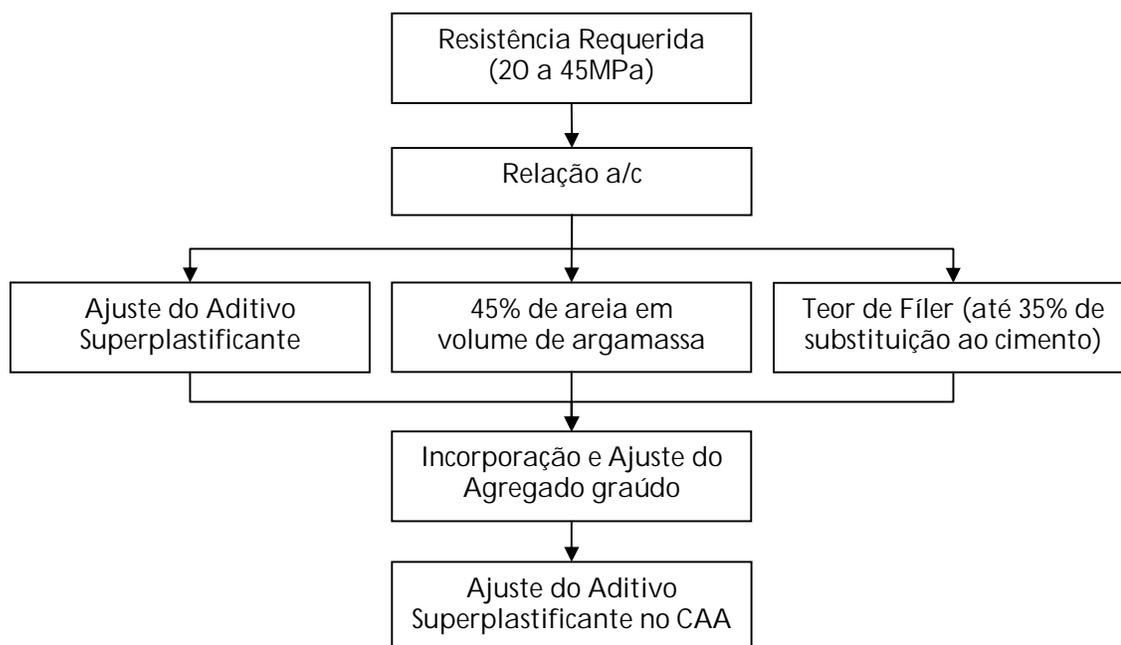


Figura 78 - Fluxograma racionalizado deste estudo para complementação do método Repette-Melo de dosagem com fíler.

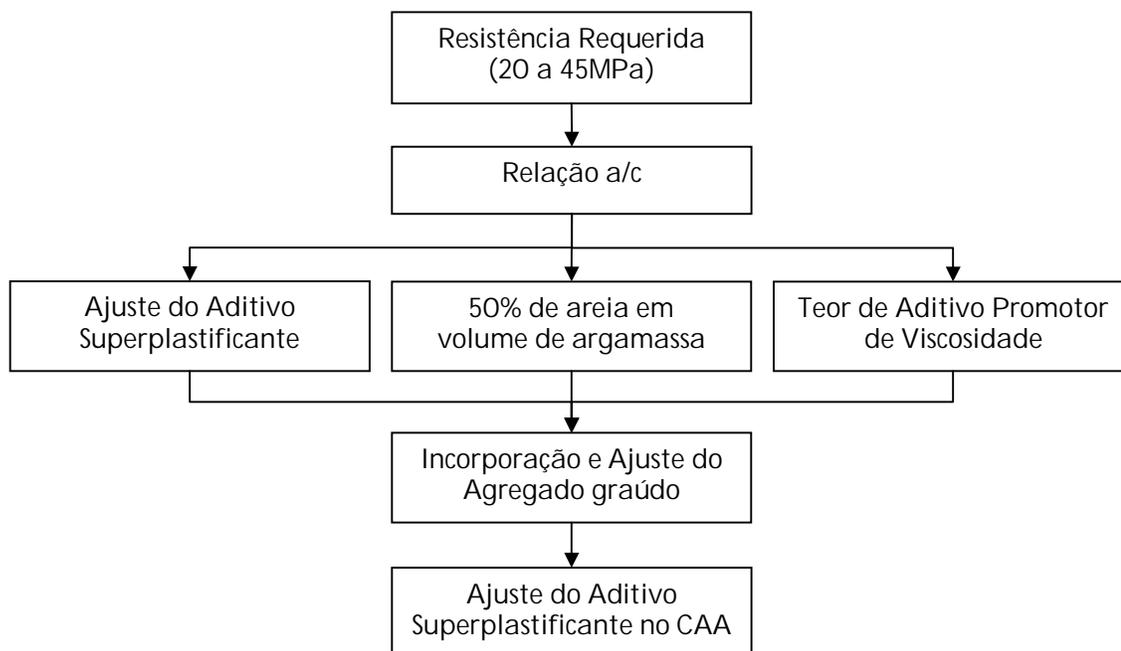


Figura 79 - Fluxograma racionalizado deste estudo para a complementação do método Repette-Melo de dosagem com APV.

Parte-se da resistência à compressão requerida entre 20 a 45 MPa, através da equação de Abrams remodelada para o CAA com filer calcário e com APV, conforme equações 9 e 10, respectivamente, onde se encontra a relação a/c da mistura.

Com o teor de areia fixado em 45 % em volume de argamassa, para a mistura de filer calcário são ajustados os teores de filer e aditivo superplastificante na fase de argamassa. Para as misturas com APV o teor de areia é fixado em 50 % em volume de argamassa, sendo ajustados os aditivos: promotor de viscosidade e superplastificante.

A argamassa deve ser ajustada para o cumprimento dos requisitos de ensaios de espalhamento com diâmetro médio entre 200 e 280 mm e funil-V com tempo de escoamento entre 5 e 10 s.

Na seqüência o teor de agregado graúdo deve ser ajustado, a fim de garantir as propriedades de auto-compactabilidade do CAA, através dos requisitos dos ensaios de espalhamento, caixa-L e funil-V.

Recomenda-se que o agregado miúdo deva estar inserido nas faixas granulométricas entre as recomendadas pela literatura de CAA (MELO, 2005) e o agregado graúdo deva possuir dimensão máxima característica de 10 mm.

5 CONCLUSÕES

Em virtude do que foi abordado, através da análise fatorial em argamassas com relação a dosagem do concreto auto-adensável, apresenta-se na seqüência, as principais conclusões ao longo desse estudo investigativo.

Com relação às argamassas ensaiadas com fíler e materiais da região da Grande Florianópolis, os teores de areia que se mostraram mais adequados ao emprego no CAA, frente aos requisitos de resistência e trabalhabilidade, foram os teores de 40 e 45 % de areia em volume na argamassa. Para se obter uma mistura mais econômica, com fíler, deve-se optar pelo uso do teor de 45 % de areia na argamassa.

Para a confecção dos CAAs, um teor de agregado graúdo foi obtido para o caso mais crítico de argamassa (teor de 50 %), e dessa forma, e adotado para as demais séries. Esse conteúdo de agregado graúdo máximo que atendeu aos parâmetros estabelecidos nos ensaios, equivaleu a 28 % do volume do concreto. Para os demais conteúdos de areia, não foi estabelecido o teor máximo para cada caso, embora se acredite que para estas séries com maior quantidade de pasta, este teor de agregado graúdo possa ser otimizado, com o seu aumento.

Já o aditivo superplastificante à base de policarboxilatos, por sua vez, demonstrou desempenho satisfatório em sua aplicação nas argamassas e concretos. Porém, na transição de argamassa para o concreto equivalente o teor de aditivo superplastificante não se manteve para a série com fíler, devendo este se adequar ao comportamento do novo material, havendo a necessidade de se fazer um ajuste em seu teor no concreto, pois à medida que sofre influência da composição do traço, do conteúdo de cimento, da temperatura, da granulometria, da forma de adição, do misturador, dentre outros fatores, o SP não se comporta de forma previsível. Já para a série com APV, na transição da argamassa para o concreto o superplastificante teve um comportamento linear. Neste caso, o que se pode sugerir é um teor mínimo de ajuste em função dos resultados obtidos neste trabalho, igual a 0,075% adicionado ao teor de SP encontrado nas argamassas equivalentes.

Com relação ao tempo decorrido após seu emprego nas misturas de argamassa e concreto, o aditivo superplastificante à base de policarboxilato perde sua eficiência de forma rápida. E sua atuação não se mantém por um período de 8 a 25 minutos, para argamassas com o aditivo promotor de viscosidade.

O modo que o aditivo superplastificante é dosado no concreto equivalente, referindo-se à quantidade inicial aplicada, ou por meio de reajustes mínimos, ou pela junção desses dois modos, acaba influenciando de forma relevante a variação da sua trabalhabilidade, incorrendo até na aceitação ou não do CAA. Desta forma, um teor inicial maior de aditivo, evitando muitos reajustes pode ser considerada a solução técnica e econômica mais adequada.

Na determinação dos ajustes de aditivo superplastificante à base de policarboxilatos nos concretos, os ensaios se mostraram bastante precisos às variações dos teores de aditivos, foram o espalhamento (*slump flow*) e a caixa-L. Estes devem ser considerados, primordialmente, no ajuste do aditivo superplastificante do CAA para argamassa equivalente.

Com base no experimento realizado com a série de argamassas com APV em substituição ao filer, concluiu-se que o mesmo não conseguiu desempenhar a mesma função do filer, de reter a água e promover maior viscosidade à mistura, para os teores de areia de 50 % na argamassa. Com a diminuição do material fino, obtiveram-se argamassas com espalhamentos e tempos de escoamento muito baixos, teores de aditivos superplastificantes elevados e também relações a/c altas, manifestando a ausência de finos. Exceção foi o traço de concreto equivalente mostrado para a série de 45% de areia, e 25% de filer, o qual foi substituído com 0,6% de aditivo promotor de viscosidade. A utilização do APV não demonstrou muita eficácia, tendo como base as relações a/c que quase não variaram com o aumento do teor do mesmo.

Para todos os teores de filer (25, 35, 45 e 55%) empregados nos grupos de argamassas com os três teores de 40%, 45% e 50% de areia na argamassa, o aumento do filer em substituição volumétrica ao cimento, provocou uma elevação da relação a/c nas misturas. Em decorrência da superfície específica do filer ser elevada e adsorver água o que contribui para o aumento da viscosidade da mistura, até atingir um determinado limite, verificado em teores distintos para cada teor de areia, com a saturação do teor de aditivo SP. Para as argamassas com 40% de areia os teores de admissíveis foram de 25, 35, 45 e 55%; para as misturas com 45% de areia, os teores de filer corresponderam a 25, 35 e 45% e para o conteúdo de 50% de areia os teores de filer equivaleram a 25 e 35%. Denota-se que com o aumento do conteúdo de areia na argamassa os teores de filer um decréscimo gradual de substituição ao cimento.

Diagramas de dosagem puderam ser confeccionadas para CAAs com 40% de areia na argamassa e 35% de filer calcário, e para a série com 50% de areia e 0,3% de aditivo promotor de viscosidade, a partir dos resultados dos ensaios do estudo fatorial em argamassa que possibilitavam a confecção destes diagramas. Dessa forma, conseguiu-se implementar

alguns procedimentos para a dosagem do CAA com o uso do APV através do método de dosagem Repette-Melo.

5.1 Proposição para Estudos Complementares

Como sugestão, propõe-se um estudo com maior abrangência do APV, visto que é um produto de alta disponibilidade no mercado que, conjuntamente com o cimento e o aditivo superplastificante, pode ser insumo indispensável para a confecção de CAA em qualquer lugar, sem o inconveniente apresentado pelo filer, de ser encontrado em apenas algumas regiões.

Cita-se ainda o comportamento do APV, aquém do esperado, podendo estar relacionado com sua sensibilidade à energia de mistura dos equipamentos utilizados, ao tempo de mistura, à temperatura, à incorporação de ar e também à influência da ordem de colocação dos materiais no misturador. Fatores estes que podem ser investigados e estudados de forma mais criteriosa, para assim poder utilizar o APV com maior regularidade.

Deve-se investigar os efeitos do aditivo superplastificante de base policarboxilatos com relação ao seu tempo de eficiência, para se conseguir manter a fluidez do CAA por um período mínimo de tempo para a execução dos ensaios, tendo em vista que sua perda de eficiência é bastante acentuada.

Outra questão levantada, diz respeito ao ajuste (redosagem) do teor de aditivo superplastificante quando ocorre a transferência de argamassa para o CAA equivalente. Recomenda-se estudar as diferentes formas de ajustes (teor inicial e reajustes) do CAA com a finalidade de se prever o teor mínimo de superplastificante, visando a economia.

Para trabalhos futuros cabe ainda ser investigado o comportamento das argamassas com intervalos menores de variação, em 2,5 %, para o teor de areia em volume, a fim de se conseguir traços mais otimizados.

6 REFERÊNCIAS

AARRE, T., DOMONE P. **Reference concretes for evaluation of test methods for SCC**. In Self Compacting Concrete: Proceedings of the 3rd RILEM Symposium, O. Wallevik, and I. Nielsson, Eds. RILEM Publications, Reykjavik, Iceland, 2003, pp. 495-505.

AÍTCIN, P. C. **Concreto de alto desempenho**. 1. ed. São Paulo: PINI, 2000. 667 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 5738: **Concreto - procedimento para moldagem e cura de corpos-de-prova**. Rio de Janeiro, 2003.

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

_____. NBR 6508: **Grãos de solo que passam na peneira de 4,8mm – Determinação da massa específica por meio de picnômetro**. Rio de Janeiro, 1984.

_____. NBR 7211: **Agregado para concreto**. Rio de Janeiro: ABNT, 1983.

_____. NBR 7215: **Cimento Portland – Determinação da resistência à compressão**. Rio de Janeiro, 1996.

_____. NBR 7251: **Agregado em estado solto – Determinação da massa unitária**. Rio de Janeiro: ABNT, 1982.

_____. NBR 7810: **Agregado em estado compactado e seco – Determinação da massa unitária**. Rio de Janeiro: ABNT, 1983.

_____. NBR 9775: **Agregados – Determinação da umidade superficial em agregados miúdos por meio do Frasco de Chapman**. Rio de Janeiro: ABNT, 1987.

_____. NBR 13278: **Argamassa para assentamento de paredes e revestimento de paredes e tetos - Determinação da densidade de massa e do teor de ar incorporado**. Rio de Janeiro, 1995.

_____. NBR NM 30: **Agregado miúdo – Determinação da absorção de água**. Rio de Janeiro: ABNT, 2001.

_____. NBR NM 46: **Agregados - Determinação do material fino que passa através da peneira 75 micrometro, por lavagem**. Rio de Janeiro: ABNT, 2003.

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

_____. NBR NM 248: **Agregados – Determinação da composição granulométrica**. Rio de Janeiro, 2003.

BANFILL, P. F. G. **The Rheology of Fresh Cement and Concrete – A Review.** Proc 11th International Cement Chemistry Congress, Durban, May 2003.

BROUWERS, H. J. H., RADIX, H. J. **Self-Compacting Concrete: Theoretical and experimental study.** Cement and Concrete Research, v. 35, p. 2116-2136, 2005.

COLLEPARDI, M., **Main Ingredients and Basic Principles for SCC Production,** Department of Applied Physical Chemistry, Politecnico of Milan, Italy.

COLLEPARDI, M., BORSOI, A., COLLEPARDI, S., TROLI, R., **Recent Developments of Special SCC's,** Proceedings of Seventh CANMET/ACI International Conference on Recent Advances in Concrete Technology, Las Vegas, USA, May 2004, pp. 1-18.

CORRADI, R., KHURANA, R., MARGARROTO, R. **User friendly self-compacting concrete in precast production.** In Self Compacting Concrete: Proceedings of the 3rd RILEM Symposium, O. Wallevik, and I. Nielsson, Eds. RILEM Publications, Reykjavik, Iceland, 2003, pp. 457-466.

COPPOLA, I. **Rheology and mix proportioning of self-compacting concretes.** Industria Italiana del Cemento, v. 71, n. 2, p. 152-163, Feb. 2001.

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

DOMONE, P.L., JIN, J. **Proprieties of mortar for self-compacting concrete.** In Self Compacting Concrete: Proceedings of the First International RILEM Symposium, A. Skarendahl, and O. Petersson, Eds. RILEM Publications, Cachan Cedex, France, 1999, pp. 109-120.

Degussa Construction Chemicals. **Fichas Técnicas de Aditivos.** Disponível em <http://www.degussa-cc.com.br/dcc_lista_subcategoria.asp?idcategory=1>. Acesso em 06 de agosto de 2006.

EDAMATSU, Y., NISHIDA, N. **A rational mix-design method for self-compacting concrete considering interaction between coarse aggregate and mortar particles** In Self Compacting Concrete: Proceedings of the First RILEM Symposium, A. Skarendahl, and O. Petersson, Eds. RILEM Publications, Cachan Cedex, France, 1999, pp. 309-320.

EDAMATSU, Y., SUGAMATA, T., OUCHI, M. **A mix method for self-compacting concrete based on mortar flow and funnel tests.** In Self Compacting Concrete: Proceedings of the 3rd RILEM Symposium, O. Wallevik, and I. Nielsson, Eds. RILEM Publications, Reykjavik, Iceland, 2003, pp. 345-367.

EFCA - European Federation of Concrete Admixture Associations. **SCC Materials Guidelines,** 2005.

EFNARC - European Federation of Specialist Construction Chemicals and Concrete Systems). **The European Guidelines for Self-Compacting Concrete, Specification, Production and Use.** Reino Unido, 2005.

GETTU, R., AGULLÓ, L. **Estado del Arte del Concreto Autocompactable y su Caracterización**. Universidad Politécnica de Cataluña, Informe C4745/1, Barcelona, Abril 2003.

GETTU, R., GOMES, P., AGULLÓ, L., BERNARD, C. **Hormigones Autocompactables, Desarrollo y Caracterización**. Universidad Politécnica de Cataluña, Barcelona, 2001.

GHEZAL A. **The effects of HRWRA-VMA combinations on fresh behavior of concrete equivalent mortar based on blended cement**. In Self Compacting Concrete: Proceedings of the 3rd RILEM Symposium, O. Wallevik, and I. Nielsson, Eds. RILEM Publications, Reykjavik, Iceland, 2003, pp. 122-135.

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**. 2002. 139 p. Tese - Escola Técnica Superior D'Enginyers de Camins, Universitat Politècnica de Catalunya, Catalunya, 2002.

KHAYAT, K. H. **Workability, testing, and performance of self-consolidating concrete**. ACI Materials Journal, v. 96, n. 3, p. 346-353, May/June 1999.

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

KOEHLER E., FOWLER D., **Summary of Concrete Workability Test Methods**. ICAR Report 105.1 International Center for Aggregates Research, August 2003.

KORDTS, S. **Herstellung und Steuerung der Verarbeitbarkeitseigenschaften selbstverdichtender Betone**. Bauingenieurwesen und angewandte Geowissenschaften der Technischen Universität Berlin zur Erlangung des akademischen Grades, Fevereiro, Berlin, 2005.

KORDTS, S. BREIT, W. **Assessment of the fresh concrete properties of self compacting concrete**. In Self Compacting Concrete: Proceedings of the 3rd RILEM Symposium, O. Wallevik, and I. Nielsson, Eds. RILEM Publications, Reykjavik, Iceland, 2003.

MAILVAGANAM, N. P. **Admixture Compatibility in Special Concretes**. In: 2nd CANMET/ACI International Conference in High-Performance Concrete, Performance and Quality of Concrete Structures, 1999, Gramado. Proceedings... Gramado: ACI SP-186, 1999. p. 615-34.

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

MELO, K. **Contribuição à dosagem de concreto auto-adensável com adição de filer calcário**. 2005. Dissertação (Mestrado em Construção Civil) – Universidade Federal de Santa Catarina.

MELO, K. A., MARTINS, V. C., PRUDÊNCIO Jr., L. R., REPETTE, W. L. **Curvas de Abrams para concretos produzidos com os principais tipos de cimento e agregados empregados na região de Florianópolis.** Em: Anais do 46º Congresso Brasileiro do Concreto, 2004, Florianópolis. Anais... Florianópolis, 2004.

MELO, K., REPETTE, W. L. **Influência do teor de finos nas propriedades concreto auto-adensável: com adição de filer calcário.** Em: Anais do 47º Congresso Brasileiro do Concreto, 2005, Recife. Anais... Recife, 2005.

MELO, K., SILVA, W. R. L., REPETTE, W. L. **Concreto auto-adensável: avaliação do teor de aditivo superplastificante para garantia da fluidez em pasta, argamassa e concreto.** Em: Anais do 47º Congresso Brasileiro do Concreto, 2005, Recife. Anais... Recife, 2005.

NASVIK, J., **Formwork for self-consolidating concrete: there are many good reasons to use SCC—but some cautions are necessary,** Concrete Construction, Oct, 2004.

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

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

OKAMURA, H. **Self-compacting high performance concrete.** Concrete International, v. 19, n. 7, p. 50-54, July 1997.

OKAMURA, H., OUCHI M., **Self-Compacting Concrete: Development, Present Use and Future.** In Self Compacting Concrete: Proceedings of the First International RILEM Symposium, A. Skarendahl, and O. Petersson, Eds. RILEM Publications, Cachan Cedex, France, 1999, pp. 3-14.

OKAMURA, H.; OUCHI, M. **Self-compacting concrete.** Journal of Advanced Concrete Technology, v. 1, n. 1, p. 5-15, April 2003.

OUCHI, M. **Self-compacting Concrete Development, applications and investigations.** Japan, 1999. Disponível em <http://www.portcement.org/pdf_files/LS001.pdf>. Acesso em 21 de junho de 2006.

OUCHI M., EDMATSU, Y. **A simple evaluation method for interaction between coarse aggregate and mortar particles in Self-Compacting Concrete.** In Self Compacting Concrete: Proceedings of the First International RILEM Symposium, A. Skarendahl, and O. Petersson, Eds. RILEM Publications, Cachan Cedex, France, 1999, pp. 121-152.

OUCHI, M.; NAKAMURA, S.; OSTERBERG, T.; HALLBERG, S.; LWIN, M. **Applications of Self-Compacting Concrete in Japan, Europe and The United States,** ISHPC 2003.

PEREIRA, E., BARROS, J., CAMÕES, A., **Betão Autocompactável Reforçado com Fibras de Aço. Método de concepção e propriedades mecânicas.** Técnica. Maio, 2004.

PRUDÊNCIO JR., L. R. **Materiais de construção civil**. 2005. 135 f. Notas de aula.

RAMACHANDRAN, V. S. et al. **Superplasticizers: properties and applications in concrete**. 1. ed. Ottawa: CANMET, 1998. 404 p.

RAMACHANDRAN, V. S. e FELDMAN, R. F. **Cement Science**. In: RAMACHANDRAN, V. S. (Ed.). **Concrete admixtures handbook: properties, science and technology**. 1. ed. Park Ridge, NJ, USA: Noyes Publications, 1984. p. 1-53.

RAMACHANDRAN, V. S. e MALHOTRA, V. M. **Superplasticizers**. In: RAMACHANDRAN, V. S. (Ed.). **Concrete admixtures handbook: properties, science and technology**. 1. ed. Park Ridge, NJ, USA: Noyes Publications, 1984. p. 211-68.

REPETTE, L. W. **Concretos de última geração: presente e futuro**. In: CONCRETO: Ensino, Pesquisa e Realizações. São Paulo: IBRACON, 2005, V. 2, cap. 49, p. 1509-1550.

SILVA, W. R. L., REPETTE, W. L., KRAUS, Z. F. **Dosagem de concreto auto-adensável (CAA) com base no comportamento das argamassas – Otimização da definição do teor de aditivo superplastificante**. Em: Anais do 6º Simpósio EPUSP de Estruturas de Concreto, 2006, São Paulo. Anais... São Paulo, 2006.

SUGAMATA, T. EDAMATSU, Y. OUCHI, M. **A study of particle dispersing retention effect of polycarboxylate-based superplasticizers**. In Self Compacting Concrete: Proceedings of the 3rd RILEM Symposium, O. Wallevik, and I. Nielsson, Eds. RILEM Publications, Reykjavik, Iceland, 2003, pp. 420-431.

TUTIKIAN, B., **Método para dosagem de concretos auto-adensáveis**. Porto Alegre, 2004. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

WÜSTHOLZ, T. **Fresh Properties of Self-Compacting Concrete (SCC)**, Otto-Graf-Journal Vol. 14, 2003.

WÜSTHOLZ T. **A Model Approach to Describe the Fresh Properties of Self-Compacting Concrete (SCC)**. Otto-Graf-Journal 79 Vol. 16, 2005.