

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

**CONTRIBUIÇÃO À DOSAGEM DE CONCRETO AUTO-ADENSÁVEL  
COM ADIÇÃO DE FÍLER CALCÁRIO**

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.

**KAROLINE ALVES DE MELO**

Orientador: Prof. Dr. Wellington Longuini Repette

Florianópolis, março de 2005

*Dedico este trabalho aos meus pais, José  
Alves e Renilda, e ao meu noivo Joaquim,  
pela paciência, compreensão e apoio em  
todos os momentos.*

## AGRADECIMENTOS

A todos os que ajudaram na doação dos materiais e equipamentos para que fosse possível a realização do trabalho experimental. Obrigado pela disponibilidade, pela gentileza e paciência com que nos atenderam.

A Polimix Concreto Ltda., na pessoa da Eng.<sup>a</sup> Leila Beatriz da Silva pela doação dos agregados.

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

A Masters Builders Technology – MBT, na pessoa do Eng. Paulo Santos, pela doação dos aditivos.

A Calfipar, na pessoa do Eng. Marcelo, pela doação do fíler calcário.

A Gulin, pela doação do fíler calcário, por intermédio da Prof.<sup>a</sup> Janaíde Cavalcante Rocha.

A Grace do Brasil, na pessoa do Eng. Patrick Dal Molin, pela doação dos equipamentos necessários à realização dos ensaios, e do Eng. Humberto Benini, pela realização dos ensaios de granulometria a laser.

Ao programa de pós-graduação em Engenharia Civil da UFSC, pela oportunidade de cursar este mestrado, em especial à Prof.<sup>a</sup> Henriette, coordenadora de pós-graduação, pela paciência e dedicação.

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

Aos professores Luiz Roberto Prudêncio Jr., Paulo Roberto do Lago Helene e Paulo César Correia Gomes, por aceitarem participar da banca de avaliação deste trabalho.

Ao Prof. Wellington Longuini Repette, pela forma com que me acolheu, sendo mais do que um orientador, um amigo, um incentivador, um mestre em diversos sentidos. Por todos os ensinamentos que me passou, por acreditar em mim dando-me a oportunidade de fazer este mestrado, pela paciência e tranquilidade nos momentos de dificuldade. Serei eternamente grata por tudo o que fez por mim.

Ao Prof. Luiz Roberto Prudêncio Jr., pela oportunidade de participar do Grupo de Tecnologia em Materiais e Componentes à base de Cimento Portland – GTec. Por todos os ensinamentos divididos, pelas conversas e orientações sempre disponíveis.

Aos amigos do GTec, por terem me acolhido desde o primeiro dia, tornando mais fácil a minha adaptação à nova etapa enfrentada. Por tudo o que me ensinaram, pela ajuda em todos os sentidos e por terem sido sempre presentes durante o desenvolvimento deste trabalho. Muito obrigado pela oportunidade de fazer parte desta família!

Em especial à amiga Vanessa da Costa Martins, com quem pude conviver durante todo o período do mestrado, na sala de aula, nos trabalhos em conjunto, nas atividades no laboratório

e nos grandes momentos em que partilhamos alegrias, dúvidas ou preocupações. Obrigada Vane por ter conhecido alguém tão especial como você!

Ao amigo e bolsista Wilson Ricardo Leal da Silva, por ter me ajudado diretamente no desenvolvimento do trabalho experimental, fazendo com que os dias cansativos no laboratório se tornassem mais fáceis e mais alegres. Valeu Wilson, pela força e pelo empenho dedicados a este trabalho.

Aos técnicos do Laboratório de Materiais de Construção Civil – LMCC, Luiz Henrique dos Santos e Renato Santana da Lapa, e ao funcionário Roque Medeiros de Lima, pelo apoio dado durante a realização dos trabalhos no laboratório, estando sempre presentes nos momentos em que precisei.

Aos meus pais, José Alves e Renilda, por sempre me incentivarem a seguir meu caminho com respeito e honestidade, pelo amor incondicional em todas as circunstâncias, por terem plantado em mim o desejo de lutar e alcançar meus objetivos, e principalmente, por suportarem a minha ausência durante este mestrado, sempre me apoiando e dando forças para continuar. Sem vocês esta vitória não seria possível.

Ao meu noivo Joaquim, por ter sido presente em todas as ocasiões, apesar da distância. Por ter sido forte para me fazer forte em diversas situações, pela paciência com que encarou a ausência e a saudade. Obrigado meu amor, pelo incentivo que sempre me deu e por você fazer minha vida ainda mais feliz.

Ao meu irmão Kléber, meus avós José Soares e Olívia, demais familiares, e à família do meu noivo, que me acompanharam, torcendo, rezando e me ajudando a cumprir esta etapa da minha vida. Aos amigos de longe e de perto com quem sempre pude contar, e que me ajudaram e continuarão me ajudando a fazer o melhor.

Às amigas Karla Regina Brunaldi e Luciana de Oliveira Carvalho, por terem sido minha família, dividindo não só a casa, mas as alegrias, angústias e preocupações do dia-a-dia. Pelas amigas Bete, Adri, Ju e Mari, que também foram um pedacinho da minha família, ajudando-me a diminuir a saudade de casa.

Aos grandes amigos, irmãos e companheiros da Família Grupo de Oração Universitário – GOU de Florianópolis, pela acolhida que recebi, pelo amor com que convivemos, pela partilha em todos os sentidos, e por não me deixarem sentir só em nenhum momento. Obrigado por tudo o que vivemos e por me permitirem fazer parte da vida de cada um de vocês.

A Deus, que me concedeu a oportunidade de cursar este mestrado. Por ter providenciado tudo nestes dois anos da minha vida, e pelos dons que derramou sobre mim, capacitando-me para o desenvolvimento deste trabalho. Por me preencher em todos os momentos com a sua força, consolo e proteção. Obrigado Senhor porque tu és o meu tudo!

*“A maravilhosa disposição e harmonia do universo só pode ter tido origem segundo o plano de um Ser que tudo sabe e que tudo pode. Isto fica sendo a minha última e mais elevada descoberta.”*

*Isaac Newton*

## SUMÁRIO

<b>LISTA DE TABELAS</b> .....	<b>X</b>
<b>LISTA DE FIGURAS</b> .....	<b>XII</b>
<b>RESUMO</b> .....	<b>XIV</b>
<b>ABSTRACT</b> .....	<b>XV</b>
<b>1 INTRODUÇÃO</b> .....	<b>16</b>
1.1 Considerações iniciais.....	16
1.2 Objetivos .....	17
1.3 Apresentação do trabalho .....	18
<b>2 CONCRETO AUTO-ADENSÁVEL</b> .....	<b>20</b>
2.1 Histórico .....	20
2.2 Propriedades e principais características .....	21
2.3 Aspectos reológicos.....	25
2.4 Vantagens e aplicação.....	29
<b>3 PRODUÇÃO DO CONCRETO AUTO-ADENSÁVEL</b> .....	<b>33</b>
3.1 Materiais .....	33
3.1.1 Cimento.....	34
3.1.2 Adições .....	36
3.1.2.1 Cinza volante .....	38
3.1.2.2 Sílica ativa .....	39
3.1.2.3 Escória de alto-forno.....	39
3.1.2.4 Fíler calcário .....	40
3.1.3 Agregados .....	42
3.1.3.1 Agregado miúdo .....	46
3.1.3.2 Agregado graúdo .....	47
3.1.4 Água .....	48
3.1.5 Aditivos .....	48
3.1.5.1 Superplastificantes .....	49
3.1.5.2 Promotores de viscosidade .....	53
3.2 Dosagem.....	55
3.2.1 Método de Okamura.....	59
3.2.2 Outros exemplos de métodos de dosagem do CAA .....	62
3.2.3 Limitações dos métodos de dosagem do CAA.....	67
3.3 Cuidados básicos na produção e aplicação.....	69
<b>4 ENSAIOS EM CONCRETO AUTO-ADENSÁVEL</b> .....	<b>72</b>
4.1 Capacidade de preenchimento e resistência ao bloqueio .....	72
4.1.1 Ensaio de espalhamento .....	72
4.1.2 Funil -V .....	74
4.1.3 Caixa-L .....	75
4.1.4 Caixa-U .....	76
4.1.5 Orimet.....	77
4.1.6 Anel japonês .....	78
4.1.7 Requisitos de ensaio para CAA .....	79
4.2 Resistência à segregação.....	79
4.3 Propriedades reológicas .....	81
4.4 Avaliação do concreto em campo .....	82
<b>5 MATERIAIS E MÉTODO</b> .....	<b>84</b>
5.1 Seleção e caracterização dos materiais .....	88
5.1.1 Cimento.....	88

5.1.2 Fíler calcário .....	90
5.1.3 Agregados .....	91
5.1.4 Aditivo .....	93
5.2 Definição dos parâmetros básicos para composição das misturas .....	94
5.2.1 Faixas granulométricas ideais .....	94
5.2.2 Relação água/cimento .....	95
5.2.3 Estudo em pasta .....	96
5.2.3.1 Determinação do teor de finos .....	97
5.2.3.2 Determinação do teor de saturação do aditivo .....	98
5.2.4 Estudo em argamassa.....	102
5.2.4.1 Determinação do teor de agregado miúdo .....	102
5.2.4.2 Determinação do teor de aditivo através dos ensaios de espalhamento e fluidez .....	103
5.2.5 Produção do concreto .....	105
5.2.5.1 Ajuste do agregado graúdo .....	107
5.2.5.2 Ajuste do aditivo.....	110
5.2.5.3 Perda de fluidez .....	113
5.2.5.4 Caracterização dos concretos.....	113
<b>6 APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS.....</b>	<b>117</b>
6.1 Curva granulométrica dos agregados .....	117
6.2 Estudo em pasta.....	117
6.2.1 Teor de finos .....	118
6.2.2 Teor de saturação do aditivo .....	118
6.2.2.1 Ensaios com o Cone de Marsh.....	118
6.2.2.2 Ensaios com o viscosímetro.....	120
6.2.2.3 Definição do teor de saturação do aditivo em função do método de ensaio.....	122
6.2.2.4 Relação entre o teor de fíler e o teor de saturação do aditivo.....	126
6.3 Estudo em argamassa.....	126
6.3.1 Teor de agregado miúdo .....	126
6.3.2 Teor de aditivo .....	128
6.3.3 Resistência à compressão.....	132
6.3.4 Massa específica e teor de vazios .....	133
6.4 Estudo em concreto.....	134
6.4.1 Teor de agregado graúdo .....	134
6.4.2 Teor de aditivo .....	134
6.4.3 Perda de fluidez.....	135
6.4.4 Segregação e exsudação.....	137
6.4.5 Massa específica e teor de vazios .....	139
6.4.6 Resistência à compressão e módulo de elasticidade .....	140
6.5 Análise dos resultados com relação à otimização da dosagem.....	142
6.5.1 Teor de finos .....	142
6.5.2 Teor de aditivo .....	143
6.5.3 Auto-compactabilidade e reologia.....	146
6.5.4 Resistência à compressão.....	148
6.6 Dosagem dos materiais .....	150
6.6.1 Proporcionamento e consumos .....	150
6.6.2 Análise de custos .....	153
6.6.3 Curvas para definição dos parâmetros de dosagem.....	154
<b>7 PROPOSIÇÃO DE UM MÉTODO OTIMIZADO DE DOSAGEM PARA CAA ....</b>	<b>157</b>
7.1 Descrição geral .....	157

<b>7.2 Definição dos parâmetros de dosagem.....</b>	<b>158</b>
<b>7.2.1 Composição da pasta .....</b>	<b>158</b>
7.2.1.1 Relação água/cimento.....	158
7.2.1.2 Teor de finos .....	159
<b>7.2.2 Composição da argamassa.....</b>	<b>159</b>
7.2.2.1 Teor de agregado miúdo.....	160
7.2.2.2 Ajuste final do teor de adição.....	161
<b>7.2.3 Composição do concreto.....</b>	<b>162</b>
7.2.3.1 Teor de agregado graúdo.....	162
7.2.3.2 Ajuste final do aditivo .....	163
<b>7.3 Avaliação das propriedades mecânicas .....</b>	<b>163</b>
<b>8 CONCLUSÕES.....</b>	<b>165</b>
<b>8.1 Sugestões para trabalhos futuros .....</b>	<b>167</b>
<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....</b>	<b>169</b>
<b>APÊNDICE 1 .....</b>	<b>178</b>
<b>APÊNDICE 2 .....</b>	<b>181</b>
<b>APÊNDICE 3 .....</b>	<b>182</b>
<b>APÊNDICE 4 .....</b>	<b>183</b>
<b>APÊNDICE 5 .....</b>	<b>184</b>

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1. – Efeitos de diferentes materiais na reologia de argamassas (BANFILL, 1994)	29
Tabela 2. – Faixas de proporção dos materiais para CAA propostas na literatura.....	58
Tabela 3. – Faixas de resultados para a avaliação do CAA em termos de deformabilidade e resistência ao bloqueio .....	79
Tabela 4. – Resumo do procedimento experimental adotado no desenvolvimento do trabalho .....	87
Tabela 5. – Características do cimento CP V ARI RS (Dados fornecidos pelo fabricante) .....	89
Tabela 6. – Principais características do fíler.....	91
Tabela 7. – Composição química do fíler F2 .....	91
Tabela 8. – Características dos agregados .....	92
Tabela 9. – Características do aditivo Glenium 51 .....	94
Tabela 10. – Identificação das misturas em função do teor de fíler.....	98
Tabela 11. – Variabilidade do Cone de Marsh.....	99
Tabela 12. – Variabilidade dos ensaios de espalhamento e Funil-V em argamassa.....	104
Tabela 13. – Massas unitárias das composições de agregado graúdo .....	108
Tabela 14. – Limites de aceitação do CAA de acordo com o método de ensaio .....	112
Tabela 15. – Teores de fíler .....	118
Tabela 16. – Teores de saturação do aditivo obtidos no Cone de Marsh.....	120
Tabela 17. – Viscosidade e tensão de escoamento das pastas no ponto de saturação do aditivo.....	122
Tabela 18. – Teor de saturação do aditivo obtido pelo Cone de Marsh e pela viscosidade .....	125
Tabela 19. – Resultados dos ensaios de auto-compactabilidade em argamassa para determinação do teor de agregado miúdo .....	127
Tabela 20. – Teor de aditivo e auto-compactabilidade das argamassas .....	129
Tabela 21. – Relação entre os ensaios de espalhamento e fluidez segundo critério definido no Método de dosagem de Okamura .....	131
Tabela 22. – Resultados de resistência à compressão das argamassas .....	132
Tabela 23. – Massa específica e teor de vazios das argamassas .....	133
Tabela 24. – Resultados dos ensaios para definição do teor de agregado graúdo no concreto.....	134
Tabela 25. – Teor de aditivo e auto-compactabilidade dos concretos.....	135
Tabela 26. – Perda de fluidez e temperatura dos concretos .....	136
Tabela 27. – Resultados dos ensaios de exsudação e segregação dos concretos .....	139
Tabela 28. – Massa específica e teor de vazios dos concretos .....	140
Tabela 29. – Propriedades mecânicas dos concretos .....	140
Tabela 30. – Módulo de elasticidade obtido experimentalmente e a partir da NBR 6118 (2004).....	142
Tabela 31. – Teor de aditivo das fases de pasta, argamassa e concreto .....	143
Tabela 32. – Diferença no teor de aditivo entre as fases de pasta, argamassa e concreto para o fíler F2 .....	145
Tabela 33. – Traços em massa dos concretos produzidos com fíler F1 .....	150
Tabela 34. – Traços em massa dos concretos produzidos com fíler F2 .....	150
Tabela 35. – Consumos dos materiais na produção do CAA com fíler F1, em massa...151	151
Tabela 36. – Consumos dos materiais na produção do CAA com fíler F2, em massa ...151	151
Tabela 37. – Consumos dos materiais na produção do CAA com fíler F1, em volume .151	151

<b>Tabela 38. – Consumos dos materiais na produção do CAA com filer F2, em volume</b>	<b>.152</b>
<b>Tabela 39. – Custo do cimento e aditivo empregados nos concretos e relação entre os ensaios de espalhamento e fluidez das argamassas .....</b>	<b>153</b>
<b>Tabela 40. – Leis de Abrams para CAA empregando filer calcário.....</b>	<b>154</b>
<b>Tabela 41. – Exemplo de resultados dos ensaios para escolha do teor de agregado miúdo .....</b>	<b>161</b>
<b>Tabela 42. – Limites de aceitação do CAA de acordo com o método de ensaio .....</b>	<b>163</b>

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Bloqueio do agregado ao redor da armadura (NUNES, 2001) .....	22
Figura 2 – Mecanismo de resistência ao bloqueio (OKAMURA; OUCHI, 2003a) .....	23
Figura 3 – Variação entre o abatimento ( <i>slump</i> ) e espalhamento ( <i>Slump flow</i> ) do concreto no cone de Abrams (KHAYAT, 1999) .....	24
Figura 4 – Comportamento reológico de diferentes fluidos (BANFILL, 1994) .....	26
Figura 5 – Comportamento reológico do concreto (NUNES, 2001) .....	27
Figura 6 – Taxas de cisalhamento referentes ao processo de utilização do concreto (SAAK et al., 2001) .....	28
Figura 7 – Grau de adensamento do agregado miúdo na argamassa e do agregado graúdo no concreto (OKAMURA; OUCHI, 2003a) .....	43
Figura 8 – Diâmetro médio e distância interpartícula dos agregados (BUI et al., 2002) .....	45
Figura 9 – Relação entre <i>Slump flow</i> e teor de água de uma mistura de concreto (AARRE e DOMONE, 2003) .....	46
Figura 10 – Equipamentos para determinação do teor de saturação do aditivo superplastificante: (a) Cone de Marsh; (b) Mini-slump .....	53
Figura 11 – Influência da umidade dos agregados na variação da fluidez do concreto (YURUGI; SAKAI, 1998) .....	54
Figura 12 – Comparação de dosagem entre concreto convencional e CAA (OKAMURA; OUCHI, 2003a) .....	57
Figura 13 – Exemplo de curva para determinação da relação água/finos ( $V_w/V_p$ ) em função do espalhamento das pastas (NUNES, 2001) .....	61
Figura 14 – Fluxograma do Método de dosagem de Okamura (NUNES, 2001) .....	62
Figura 15 – Método de dosagem proposto pelo CBI (NUNES, 2001) .....	63
Figura 16 – Fluxograma do método de dosagem para CAA de alta resistência (GOMES, 2002) .....	65
Figura 17 – Balanço de forças atuando sobre uma partícula de agregado imersa numa pasta de cimento (SAAK et al., 2001) .....	66
Figura 18 – Região de auto-compactabilidade em termos de espalhamento ( <i>Slump flow</i> ) e viscosidade da pasta de cimento (BUI et al., 2002) .....	67
Figura 19 – Ensaio de espalhamento ou <i>Slump flow</i> : (a) concreto; (b) argamassa (NUNES, 2001) .....	73
Figura 20 – Funil-V: (a) concreto; (a) argamassa (NUNES, 2001) .....	74
Figura 21 – Faixas de aplicação do CAA em relação às classes de consistência definidas pelo <i>Slump flow</i> e Funil- V (WALRAVEN, 2003) .....	75
Figura 22 – Ensaio da Caixa-L (EFNARC, 2002) .....	76
Figura 23 – Ensaio da Caixa-U (GOMES, 2002) .....	77
Figura 24 – Ensaio do Orimet (EFNARC, 2002) .....	78
Figura 25 – Anel japonês (EFNARC, 2002) .....	79
Figura 26 – Medida da sedimentação da superfície em amostra de concreto (KHAYAT, 1999) .....	80
Figura 27 – Histórico de cisalhamento em pasta (SHEINN et al., 2003) .....	82
Figura 28 – Detalhe do equipamento empregado para avaliação do CAA no campo (GOMES, 2002) .....	83
Figura 29 – Curva granulométrica do cimento empregado .....	89
Figura 30 – Curvas granulométricas dos dois tipos de filer calcário empregados .....	90
Figura 31 – Curvas granulométricas dos agregados .....	93
Figura 32 – Faixas granulométricas e composição do agregado miúdo .....	95
Figura 33 – Faixas granulométricas e composição do agregado graúdo .....	95

Figura 34 – Argamassadeira empregada na produção das pastas .....	97
Figura 35 – Ensaio do Cone de Marsh para determinação do teor de saturação do aditivo .....	100
Figura 36 – Ensaio de reologia da pasta.....	101
Figura 37 – Vista da prensa utilizada no ensaio de resistência à compressão de corpos-de-prova de argamassa.....	105
Figura 38 – Betoneira utilizada na produção do concreto .....	106
Figura 39 – Granulometria da brita 0 em relação à faixa granulométrica ideal.....	109
Figura 40 – Ensaio de espalhamento do concreto.....	110
Figura 41 – Ensaio do Funil-V .....	111
Figura 42 – Ensaio da Caixa-L .....	112
Figura 43 – Molde para ensaios de exsudação, massa específica e teor de vazios .....	114
Figura 44 – (a) Moldagem dos corpos-de-prova; (b) Acompanhamento da temperatura do concreto .....	115
Figura 45 – Ensaio de módulo de elasticidade .....	116
Figura 46 – Distribuição granulométrica dos agregados em relação à faixa.....	117
Figura 47 – Curvas resultantes do ensaio do Cone de Marsh: (a) pastas com fíler F1; (b) pastas com fíler F2 .....	119
Figura 48 – Curvas obtidas no ensaio de reologia para a pasta 7 com 0,2% de aditivo	121
Figura 49 – Cone de Marsh (t) e viscosidade (h) versus %aditivo .....	123
Figura 50 – Cone de Marsh (t) e tensão de escoamento ( $t_0$ ) versus %aditivo .....	124
Figura 51 – Relação entre os resultados de espalhamento das argamassas em função do tipo de fíler.....	130
Figura 52 – Relação entre os resultados de tempo de escoamento das argamassas em função do tipo de fíler .....	130
Figura 53 – Evolução da resistência à compressão das argamassas .....	132
Figura 54 – Seção de corpos-de-prova após o rompimento .....	138
Figura 55 – Resistência à compressão de todas as misturas de concreto aos 7 e 28 dias	141
Figura 56 – Teor de aditivo de pasta pelo Cone de Marsh, argamassa e concreto, com fíler F1 .....	143
Figura 57 – Teor de aditivo de pasta pelo viscosímetro, argamassa e concreto, com fíler F1 .....	144
Figura 58 – Teor de aditivo de pasta, argamassa e concreto, com fíler F2 .....	144
Figura 59 – Relação entre os resultados obtidos em concretos e argamassas: (a) diâmetro de espalhamento; (b) tempo de escoamento no Funil-V.....	146
Figura 60 – Relação entre pasta e argamassa: (a) $t_0$ versus diâmetro de espalhamento; (b) h versus tempo de escoamento .....	147
Figura 61 – Relação entre pasta e concreto: (a) $t_0$ versus diâmetro de espalhamento; (b) h versus tempo de escoamento .....	148
Figura 62 – Resistência à compressão de argamassas e concretos com fíler F1 .....	149
Figura 63 – Resistência à compressão de argamassas e concretos com fíler F2 .....	149
Figura 64 – Curvas granulométricas dos sólidos no concreto 2.....	153
Figura 65 – Curvas de Abrams para a resistência à compressão dos concretos com fíler F1 .....	155
Figura 66 – Curvas de Abrams para a resistência à compressão dos concretos com fíler F2 .....	155
Figura 67 – Relação entre água/cimento e consumo de fíler .....	156
Figura 68 – Relação entre consumo de fíler e consumo de cimento.....	156
Figura 69 – Fluxograma do método de dosagem proposto.....	158

PPGEC – UFSC

## CONTRIBUIÇÃO À DOSAGEM DE CONCRETO AUTO-ADENSÁVEL COM ADIÇÃO DE FÍLER CALCÁRIO

**Karoline Alves de Melo**

### RESUMO

O concreto auto-adensável surgiu em resposta à necessidade de se concretar, com maior qualidade, elementos estruturais com elevada densidade de armadura ou com formas complexas. É caracterizado pela capacidade de se mover no interior das fôrmas sem a necessidade de adensamento, e deve atender aos requisitos de alta deformabilidade, resistência à segregação e capacidade de passar por restrições. Sua aplicação ainda não é muito difundida, especialmente devido à carência de informações relativas à dosagem. Dentre os métodos de dosagem existentes, destaca-se o método de Okamura, que tem como limitação o fato do concreto resultar com alto volume de pasta e da resistência à compressão não ser um parâmetro inicial para a dosagem. Neste trabalho, propõe-se a otimização da dosagem de concreto auto-adensável com resistência à compressão normal, variando entre 20 e 45 MPa. Os materiais utilizados foram cimento CP V ARI RS, fíler calcário como adição, areias fina e média como agregado miúdo e pedrisco como agregado graúdo, além do emprego do aditivo superplastificante de base policarboxilado. O estudo se deu a partir da otimização da dosagem das fases de pasta, argamassa e concreto, avaliando-se os requisitos de auto-compactabilidade do concreto por meio dos ensaios de espalhamento, Funil-V e Caixa-L. Foram considerados fatores relacionados à granulometria dos materiais, especialmente dos agregados, a fim de garantir o adequado preenchimento dos vazios e a redução do volume de pasta. Observou-se que o fíler calcário não exerceu grande influência nas propriedades mecânicas do concreto, tornando possível o estabelecimento da relação água/cimento em função da resistência à compressão desejada. Os demais parâmetros de dosagem foram ajustados de forma racional, resultando em misturas bem ajustadas e econômicas. Por fim, faz-se a proposição de um método de dosagem para concreto auto-adensável, baseado no estabelecimento da resistência à compressão.

**PPGEC – UFSC**

**CONTRIBUTION TO MIX DESIGN OF SELF-COMPACTING CONCRETE WITH  
LIMESTONE FILLER**

**Karoline Alves de Melo**

**ABSTRACT**

Self-compacting concrete was developed to facilitate casting of concrete elements having high density reinforcement steel and complex shapes. It is characterized by the capacity to move into the formworks by itself, without the need for vibration. It must have high fluidity, segregation resistance and ability to pass through restrictions. The application of this type of concrete is still limited, especially due to the lack of information about mix design procedures. The Okamura's method is one of the most important among the existent methods of mix design but it results in concretes with high paste volume and do not consider compressive strength as an initial input for the mix design. In this work, an optimization of the mix design method for self-compacting concrete with normal compressive strength (strengths from 20 to 45 MPa), is advanced. The materials used were portland cement CP VARI RS, limestone filler as mineral admixture, fine and coarser sand as fine aggregate, a maximum 10 mm diameter coarse aggregate, and a polycarboxylate based superplasticizer. The study is based on the optimization of paste, mortar and concrete phases, and the self-compactability of the concrete was evaluated through the Slump flow, V-Funnel and L-box tests. Factors related to the gradation of the materials were considered, especially of the aggregates, to guarantee appropriate filling of the air voids and reduction of the paste volume. It was observed that, as the mineral admixture used is inert, it was possible to define the water/cement ratio in function of the compressive strength, with the other parameters adjusted in a rational way, resulting well adjusted and lower cost mixtures. The results of this investigation led to the proposal of a novel mix design method for self-compacting concrete, which is based on the definition of compressive strength.

## 1 INTRODUÇÃO

### 1.1 Considerações iniciais

Tem-se exigido um nível cada vez maior de resistência e durabilidade das estruturas de concreto. Com isto, diversas pesquisas têm sido realizadas em busca de um material que atenda os requisitos desejados, levando à execução de estruturas que apresentem um padrão adequado de qualidade. Um grande avanço pôde ser observado a partir da utilização dos aditivos, os quais permitiram a incorporação de características particulares ao concreto, tornando-se um insumo essencial no processo de produção das estruturas (AÏ TCIN, 2000).

Pode-se destacar, neste contexto, o surgimento do concreto de alta resistência, o qual é caracterizado por níveis de resistência e durabilidade maiores que os dos concretos convencionais, gerando grandes benefícios às estruturas. No entanto, este concreto não eliminou um problema freqüente e que pode comprometer a qualidade das estruturas de concreto armado, que consiste nas falhas decorrentes do processo de adensamento (NUNES, 2001). Estas falhas ocorrem especialmente em elementos com grande densidade de armadura, ou em áreas de difícil acesso, já que é geralmente feito por meio de agulha de imersão. Frente à necessidade de se eliminar o adensamento, mantendo-se a qualidade das estruturas, surge o concreto auto-adensável.

O concreto auto-adensável representa uma evolução dos concretos especiais, capaz de conferir à construção benefícios econômicos, tecnológicos e ambientais. A principal característica deste material é sua capacidade de se mover no interior das fôrmas por ação do peso próprio, ou seja, sem a necessidade de aplicação de forças externas para seu adensamento. Com isto, tem-se o preenchimento de todos os espaços da forma de modo uniforme, fazendo com que a estrutura apresente-se bastante homogênea (NUNES, 2001). Com isto, tem-se uma maior facilidade de lançamento e menos ruídos gerados durante sua aplicação. No entanto, para garantir a qualidade das estruturas, é necessário que este concreto não apresente exsudação e segregação.

O concreto auto-adensável exige maiores cuidados para a sua produção do que o concreto convencional, principalmente por ser muito sensível à variações das características dos constituintes e procedimentos de produção (DE LARRARD, 1999). A escolha dos materiais, por exemplo, precisa ser criteriosa, de forma que gerem composições com as propriedades desejadas para este tipo de concreto. Além disso, é importante que suas características físicas não sejam muito variáveis, especialmente em relação à granulometria.

Em relação ao concreto convencional, o concreto auto-adensável exige uma maior quantidade de material fino (preferencialmente adições) e menor volume de agregados, medidas que vão ajudar a manter a estabilidade e, conseqüentemente, a resistência à segregação do concreto. O efeito promovido pelo teor elevado de finos também pode ser conseguido através da utilização de aditivos promotores de viscosidade, sendo observados resultados diferentes no concreto quando se adota uma ou outra medida. Por outro lado, para que seja atingida a fluidez necessária, devem ser utilizados aditivos superplastificantes.

O concreto auto-adensável possui aplicação ainda restrita a alguns países, sendo pouco conhecido e aplicado em estruturas correntes de concreto armado. Suas características particulares o diferenciam do concreto convencional fazendo com que os métodos de dosagem e caracterização existentes não sejam adequados para sua avaliação. Alguns ensaios estão sendo reconhecidos e utilizados internacionalmente para avaliar o desempenho do concreto auto-adensável, mas ainda há uma deficiência de normalização, o que agrava a difusão deste novo material.

A maioria dos métodos de dosagem apresentados na literatura para o concreto auto-adensável, são baseados em suas propriedades do estado fresco, de forma que, parâmetros como a resistência à compressão, são obtidos em conseqüência do proporcionamento dos materiais. Isto é decorrente da grande quantidade de finos que deve ser empregada, bem como da baixa relação água/finos definida em função das características de deformabilidade e estabilidade da pasta. Nota-se então que há carência de métodos que possibilitem a obtenção de concretos em função da resistência à compressão desejada, que podem ser produzidos a partir da utilização de adições inertes para implementar a necessidade de finos na mistura.

A definição de métodos de dosagem que permitam um processo de produção racionalizado, otimizando os diferentes tipos de materiais e propiciando sua viabilidade econômica e técnica para uma aplicação prática, são passos que têm sido dados com o intuito de expandir o emprego do concreto auto-adensável.

## **1.2 Objetivos**

O objetivo principal deste trabalho é o desenvolvimento de um método de dosagem de concreto auto-adensável, baseado na resistência à compressão, quando utilizado fíler calcário como adição. Como objetivos específicos pode-se citar:

- verificar a adequação dos materiais da região para o emprego em concreto auto-adensável;

- definir curvas granulométricas dos sólidos, que possam orientar a escolha dos materiais;
- avaliar os métodos de ensaio apresentados na literatura, em relação à sua reprodutibilidade e definição de critérios para a obtenção de parâmetros de dosagem;
- estabelecer uma relação entre o comportamento da pasta, da argamassa e do concreto.

### **1.3 Apresentação do trabalho**

O trabalho consta de 8 capítulos, estruturados conforme a seqüência abaixo:

No Capítulo 1, tem-se uma introdução ao tema, apresentando a justificativa para o estudo, bem como os objetivos pretendidos com o trabalho.

No Capítulo 2 são apresentados os aspectos gerais envolvendo o concreto auto-adensável. Inicialmente tem-se o seu histórico, que inclui seu surgimento e desenvolvimento até os dias atuais. Em seguida, podem ser observadas as principais características deste tipo de concreto, um levantamento de suas propriedades reológicas e, por fim, as vantagens decorrentes do uso deste material e as possibilidades de aplicação.

Os aspectos relacionados à produção do concreto auto-adensável, são discutidos no Capítulo 3, no qual é feita uma abordagem dos materiais empregados, dos métodos de dosagem destes materiais, e dos cuidados que se devem tomar para a produção deste tipo de concreto.

Os métodos de ensaio para avaliação do concreto auto-adensável, em termos das suas principais propriedades, são apresentados no Capítulo 4.

O Capítulo 5 traz os materiais utilizados no presente trabalho, envolvendo sua caracterização e os critérios para a escolha. Neste Capítulo, apresenta-se também a metodologia adotada no desenvolvimento do trabalho, sendo indicadas as etapas e condições de estudo, além dos métodos de ensaio aplicados.

No Capítulo 6, tem-se a apresentação dos resultados obtidos, bem como sua análise, buscando-se determinar os parâmetros necessários para o cumprimento dos objetivos definidos.

O método de dosagem obtido a partir da análise dos resultados encontra-se no Capítulo 7. Nele tem-se o resumo das etapas a serem seguidas, parâmetros de dosagem e métodos de ensaio, definindo uma metodologia de dosagem de concreto auto-adensável utilizando filer calcário como adição.

Por fim, o Capítulo 8 traz as conclusões obtidas no trabalho, bem como delineações para a sua continuidade.

Ao final, são apresentadas as referências bibliográficas utilizadas no trabalho.

## 2 CONCRETO AUTO-ADENSÁVEL

Neste capítulo, serão abordados os principais aspectos encontrados na literatura sobre o concreto auto-adensável (CAA). Inicialmente será apresentado um breve histórico sobre seu surgimento e emprego e, em seguida, apresentam-se suas características principais, bem como as possibilidades de aplicação.

### 2.1 Histórico

Com a ampliação do campo de utilização do concreto, surgiram problemas no processo de adensamento, decorrentes principalmente da complexidade das estruturas executadas. No Japão, a partir de 1983, este problema começou a afetar os requisitos de durabilidade, levando à redução da qualidade das construções (OKAMURA, 1997). Surgiu, então, a necessidade de se desenvolver um concreto que apresentasse um grau de consistência capaz de dispensar o adensamento.

Para atender a este requisito, lançou-se mão da produção de concretos fluidos, o que foi possível devido à utilização dos aditivos superplastificantes, especialmente os de 3ª geração. Apesar deste avanço, o nível de fluidez atingido pelo material levou à ocorrência de exsudação e segregação fazendo com que sua aplicação fosse limitada. Havia a necessidade de se produzir um concreto com elevada fluidez, a ponto de eliminar o processo de adensamento, mas com adequada resistência à exsudação e segregação, além de níveis de resistência mecânica adequados (NUNES, 2001).

Com o avanço nas investigações em torno do material desejado, surge o CAA, que foi desenvolvido inicialmente no Japão, em 1986, pelo Prof. Okamura, da Universidade de Tóquio, e aplicado em um protótipo no ano de 1988 (OKAMURA, 1997; GOMES, 2002). Dentre os principais fatores que contribuíram para o desenvolvimento do novo material estava a dificuldade no adensamento do concreto, decorrente da grande quantidade de armadura, empregada para garantir resistência aos abalos sísmicos existentes na região. Além disso, havia escassez de mão-de-obra qualificada, fazendo com que houvesse uma redução na qualidade das estruturas de concreto (NUNES, 2001). O CAA foi desenvolvido, então, para garantir a execução de estruturas de concreto duráveis, incorporando qualidade ao processo de construção.

A partir de então, vários estudos têm sido desenvolvidos em diferentes países a fim de difundir o uso do CAA. Isto tem sido evidenciado pela ocorrência de diversos simpósios e conferências sobre este tema, o que demonstra o grande interesse da comunidade científica

pela otimização da produção e da aplicação deste material. O primeiro trabalho sobre CAA foi publicado em 1989, pelo Prof. Ozawa, da Universidade de Tóquio, no Second East-Asia and Pacific Conference on Structural Engineering and Construction – EASEC-2 (OKAMURA; OUCHI, 1999).

Observa-se, porém, que o uso do CAA ainda é restrito. Okamura e Ouchi (2003b) citam que, no ano de 2000, este concreto correspondia a apenas 0,15% do concreto usinado empregado no Japão, e a 0,55% dos pré-fabricados. No Brasil, o material ainda não é muito conhecido e há poucos registros de sua utilização em estruturas comuns.

O concreto auto-adensável ainda é tido como um concreto especial. Para reverter esta posição, há muitos passos a serem dados no sentido de se definirem métodos de dosagem e ensaios que possam ser aplicados mundialmente, levando assim ao surgimento de um processo de produção normalizado.

A seguir, serão apresentadas as principais características que definem as propriedades exigidas para o CAA.

## **2.2 Propriedades e principais características**

A especificação da European Federation of National Trade Associations Representing Producers and Applicators of Specialist Building Products (EFNARC), entidade europeia com sede no Reino Unido, descreve o CAA como o mais revolucionário desenvolvimento na construção de estruturas de concreto ocorrido nas últimas décadas. Este material pode ser definido como um concreto especial caracterizado principalmente pela sua capacidade de se mover no interior das fôrmas, preenchendo todos os espaços existentes entre as armaduras, o que é conseguido exclusivamente pela ação de seu peso próprio (OKAMURA, 1997; KHAYAT, 2000; COPPOLA, 2001; NUNES, 2001). Com isto, não há necessidade de aplicação de forças externas, como o uso do vibrador de imersão, para promover seu adensamento. Alguns aspectos relevantes em relação à eliminação da vibração são a redução da mão-de-obra, redução do tempo de concretagem, garantia de maior qualidade das estruturas e redução do ruído promovido.

Além desta capacidade de preenchimento, o CAA caracteriza-se também pela resistência à segregação e capacidade de passar entre espaços estreitos (SKARENDAHL; PETERSSON, 2001 apud NUNES, 2001; GOMES, 2002). Isto o diferencia de um concreto fluido, o qual é caracterizado apenas pela alta fluidez não sendo feitas exigências quanto à estabilidade da

mistura. Nota-se também uma diferenciação em relação ao concreto auto-nivelante, que é definido como um CAA em que são exigidas superfícies lisas e regulares, aceitando-se um desnível de 1 mm a cada 4 m de comprimento do elemento estrutural (ROLS et al., 1999).

A capacidade de preenchimento do CAA é conseguida pela sua alta deformabilidade (COPPOLA, 2001) que, por sua vez, é governada pela fluidez e coesão da mistura (GOMES, 2002). Quando a coesão é insuficiente pode haver separação entre a pasta de cimento e os agregados durante as etapas de transporte e espalhamento do concreto, o que caracteriza a ocorrência de segregação (KHAYAT, 2000). Portanto, uma adequada resistência à segregação é necessária para garantir uniformidade na distribuição dos diversos componentes da mistura desde a produção até sua aplicação (COPPOLA, 2001).

Deve-se atentar ainda para a capacidade do concreto em passar por restrições, que consistem nas áreas congestionadas ao redor das armaduras. Nestas regiões pode haver um bloqueio ao fluxo provocado pela acumulação de partículas sólidas, conforme exemplificado na Figura 1.

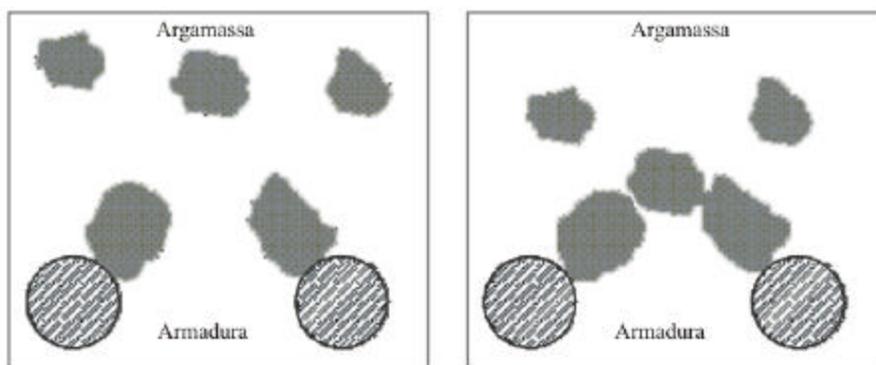


Figura 1 – Bloqueio do agregado ao redor da armadura (NUNES, 2001)

Este bloqueio é decorrente do contato entre as partículas do agregado graúdo, as quais, ao se movimentarem nas regiões próximas aos obstáculos, tendem a diminuir sua distância relativa promovendo o surgimento de tensões de cisalhamento na argamassa (OKAMURA; OUCHI, 2003a). É necessário que esta tensão seja pequena o suficiente para permitir o deslocamento dos agregados (OKAMURA, 1997), o que é obtido a partir de uma viscosidade moderada da pasta e da argamassa, além de um controle das características dos agregados, principalmente no que diz respeito ao tamanho e ao volume empregado na mistura (GOMES, 2002). A Figura 2 ilustra o mecanismo necessário para garantir adequada resistência ao bloqueio.

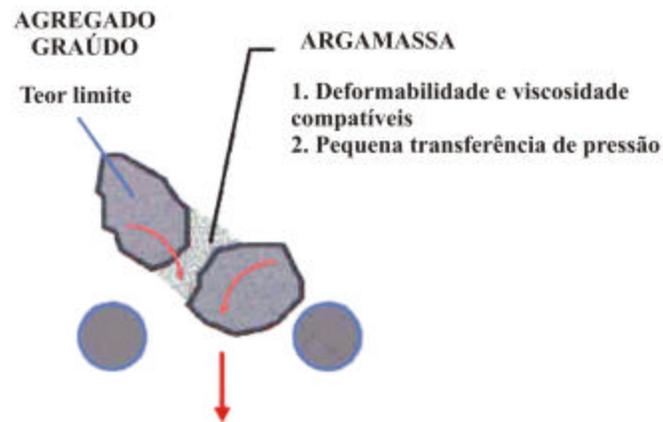


Figura 2 – Mecanismo de resistência ao bloqueio (OKAMURA; OUCHI, 2003a)

Outro fator importante no CAA diz respeito à exsudação, que deve ser controlada a fim de se evitar o enfraquecimento da aderência do concreto às armaduras, decorrente do acúmulo de água sobre as barras. Além disso, a exsudação pode provocar o desenvolvimento de fissuras, especialmente sobre as armaduras, devido à restrição imposta por elas à acomodação do concreto plástico (KHAYAT et al., 1999).

Na maioria das vezes, a qualidade do CAA é medida em termos de consistência e não em relação às propriedades mecânicas, como é o caso do concreto convencional. Diante das propriedades apresentadas, observa-se que estas não podem ser avaliadas a partir dos procedimentos de ensaio convencionais, como é o caso do ensaio de abatimento do concreto - *slump test*, utilizado para indicar a consistência. Devido à grande fluidez do CAA, o abatimento atingido por meio do cone de Abrams neste ensaio é praticamente constante, em torno de 240 a 270 mm, não sendo um bom indicativo para sua caracterização (KHAYAT, 1999). Por isto, é necessário aplicar uma metodologia própria para avaliação deste material, de forma a atender todos os requisitos de qualidade exigidos, garantindo uniformidade das estruturas e eliminando-se o surgimento de falhas de concretagem. Um dos métodos de ensaio mais utilizados é o espalhamento ou *Slump flow*, que também é realizado no Cone de Abrams, mas mede o diâmetro de abertura do concreto após seu espalhamento. Na Figura 3, tem-se a relação entre o *slump test* e o *Slump flow*.

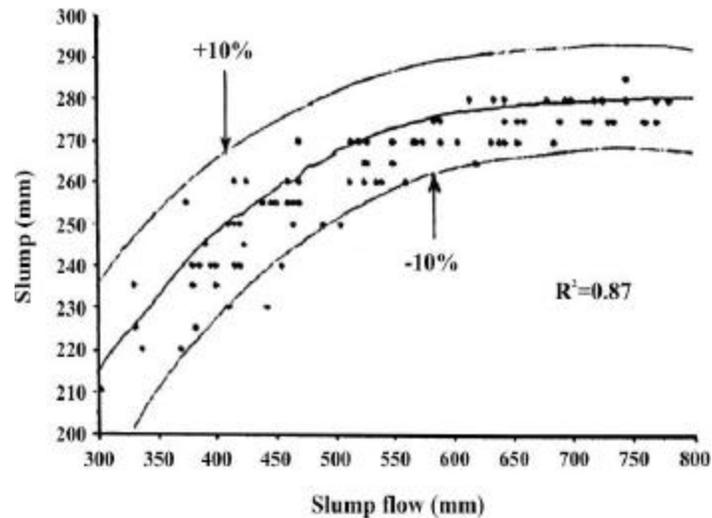


Figura 3 – Variação entre o abatimento (*slump*) e espalhamento (*Slump flow*) do concreto no cone de Abrams (KHAYAT, 1999)

Em relação às propriedades do CAA no estado endurecido, pode-se citar (KLUG; HOLSCHMACHER, 2003; SKARENDAHL, 2003):

- Microestrutura: homogênea, devido ao uso de grande quantidade de finos, que vão proporcionar uma boa distribuição granulométrica dos sólidos aumentando o empacotamento das partículas, promover o aumento da retenção de água, favorecer o processo de nucleação durante a hidratação do cimento, e aumentar a densidade da zona interfacial de transição entre a pasta de cimento e os agregados;
- Resistência à compressão: melhor em relação ao concreto convencional de mesma relação água/cimento, sendo favorecida pelas baixas relações água/finos, e pelo emprego de aditivos superplastificantes. O tipo de adição (reativa ou inerte) influencia de forma diferente o desenvolvimento da resistência à compressão no CAA;
- Módulo de elasticidade: tende a sofrer uma redução pois é bastante influenciado pelo módulo de elasticidade de cada material, especialmente dos agregados, que no CAA são empregados em menor quantidade;
- Aderência: pode ser melhor ou igual à do concreto convencional, sendo favorecida pela baixa tendência de segregação e pela melhor retenção de água do CAA, mas ainda não está completamente entendida;
- Durabilidade: Devido à melhora promovida na microestrutura do concreto, espera-se que o CAA apresente boas características de durabilidade.

Cuidados especiais devem ser tomados durante a especificação do CAA de forma a evitar a ocorrência de retração plástica e fissuras, que podem surgir devido à grande quantidade de materiais finos empregados em sua produção. Desta forma, deve-se controlar a cura para que seja iniciada o mais cedo possível (EFNARC, 2002).

O CAA pode ser usado tanto em elementos pré-moldados como em estruturas moldadas *in loco*, pode também ser produzido na própria obra ou em central dosadora de concreto. Na sua aplicação, é necessário observar a forma do elemento estrutural, a dimensão e a densidade das armaduras, além do cobrimento necessário, tendo em vista que estes aspectos exercem grande influência no desempenho da estrutura final (EFNARC, 2002).

### 2.3 Aspectos reológicos

A reologia é a ciência que estuda o fluxo e as deformações dos materiais. As características do CAA são muito influenciadas por suas propriedades reológicas, nominalmente a tensão de escoamento ( $\tau_0$ ) e a viscosidade plástica ( $\eta$ ). A tensão de escoamento consiste na tensão de cisalhamento mínima necessária para que o escoamento se inicie, e está relacionada ao estado de floculação ou dispersão das partículas. A viscosidade, por sua vez, representa o declive da reta no gráfico de tensão de cisalhamento por taxa de cisalhamento, sendo um indicativo da estabilidade da mistura (BANFILL, 1994; SHEINN et al, 2003).

O comportamento reológico do concreto tem sido adequadamente descrito pelo modelo de Bingham, definido pela Equação 1 (BANFILL, 1994).

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

Onde:  $\tau$  é a tensão de cisalhamento e  $\gamma$  corresponde à taxa de cisalhamento.

A Figura 4 mostra os comportamentos reológicos de diferentes tipos de fluidos. Observa-se que os fluidos Newtonianos, que seguem a Lei de Newton, são caracterizados por uma tensão de escoamento nula, enquanto que nos fluidos de Bingham a curva intercepta o eixo no ponto referente à tensão de cisalhamento.

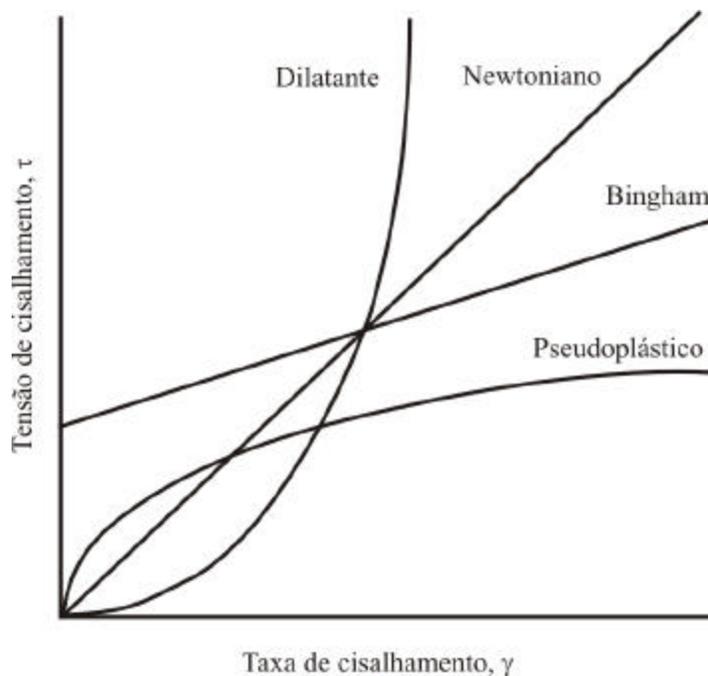


Figura 4 – Comportamento reológico de diferentes fluidos (BANFILL, 1994)

No CAA, a tensão de escoamento deve ser baixa, garantindo o aumento da fluidez, e a viscosidade deve ser moderada, para promover a estabilidade necessária. Estes parâmetros são diferentes daqueles definidos para os concretos convencionais, os quais exigem tensões de escoamento muito mais altas e viscosidades muito mais baixas (GOMES, 2002). Na Figura 5, são ilustradas faixas para as propriedades reológicas de diversos tipos de concreto. Observa-se que o CAA está situado na região de baixa tensão de escoamento e alta viscosidade plástica, enquanto que no concreto fluido  $\tau_0$  é um pouco maior e  $\eta$  é menor, condição que se acentua no caso do concreto convencional.

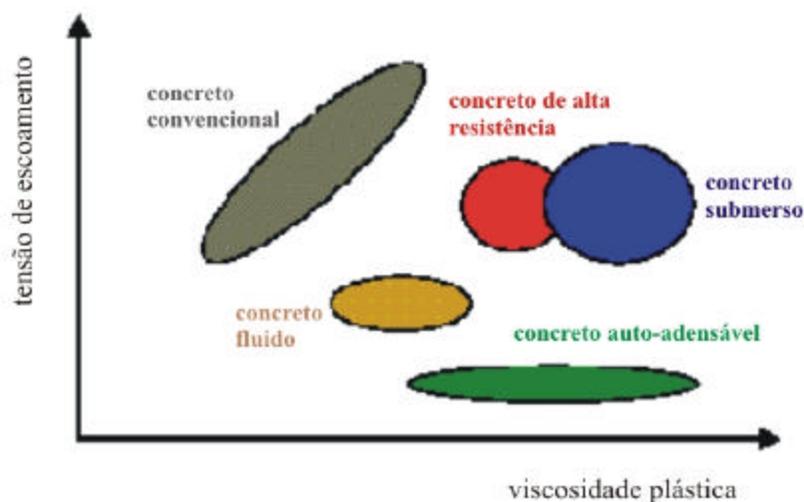


Figura 5 – Comportamento reológico do concreto (NUNES, 2001)

A reologia do concreto é controlada pela fricção da pasta, onde as finas partículas presentes influenciam química e fisicamente seu comportamento (SHEINN et al., 2003). Segundo Sugamata et al. (2003), a tensão de escoamento indica a distância entre as partículas da pasta, enquanto que a viscosidade representa a frequência de contato entre elas. Ho et al (2001 apud SHEINN et al., 2003) apontam ainda que a tensão de escoamento está mais relacionada com a deformabilidade, enquanto que a viscosidade pode ser usada como indicativo da resistência à segregação. Porém, Nielsson e Wallevik (2003) indicam que a tensão de escoamento e a viscosidade podem atuar juntas na garantia da resistência à segregação, de forma que, quando a viscosidade for muito baixa, a tensão de escoamento deve ser alta, e ao contrário, com viscosidades altas, deve-se manter a tensão de escoamento muito baixa.

Wallevik (2003) indica que a maior estabilidade do CAA pode ser atingida em função de alguns fatores como: alta tensão de escoamento, alta viscosidade plástica, tixotropia e efeito da interação entre as partículas dos agregados (as partículas menores vão segurar as maiores, impedindo-as de sedimentar).

Segundo Khayat et al. (1999), quanto menor a viscosidade do concreto, menor sua capacidade em manter a dispersão homogênea dos constituintes, o que pode causar anisotropia na direção do lançamento do concreto, enfraquecendo a aderência entre a pasta e as partículas dos agregados, bem como à armadura.

A energia aplicada na mistura também é um ponto importante a ser observado. Banfill (1994) descreve que, quanto maior esta energia, menores valores de  $\tau_0$  e  $\eta$  serão encontrados, de

forma que uma comparação entre diferentes resultados só pode ser feita se forem garantidas as mesmas condições iniciais de mistura. Takada e Walraven (2003) citam alguns fatores que promovem redução da viscosidade, decorrentes da maior intensidade da mistura, que são:

- melhor dispersão das partículas finas;
- quebra dos produtos iniciais de hidratação da superfície do cimento, fazendo com que os pequenos pedaços atuem como lubrificante entre as partículas;
- maior incorporação de ar.

Além disso, quando a energia de mistura das pastas é muito intensa, a quebra dos aglomerados é maior do que no concreto, devido à ação dos agregados, fazendo com que a pasta não represente fielmente o comportamento da mistura como um todo. Pedersen e Smeplass (2003), por sua vez, citam que a reologia da pasta está bastante relacionada com a reologia do concreto, sendo esta relação maior quando na pasta são incluídas as partículas finas dos agregados, com dimensão semelhante as do cimento e adições.

Outra forma de aproximar as condições das duas fases, é a padronização das taxas de cisalhamento sob as quais as misturas são submetidas durante o ensaio de reologia. Na confecção do concreto, deve-se considerar a taxa de cisalhamento à qual ele vai estar submetido no momento da aplicação, em função da resistência à segregação desejada. Saak et al. (2001) indicam que os procedimentos de transporte e lançamento acontecem sob baixos valores de taxa de cisalhamento, situados entre 1 e 100  $s^{-1}$ , conforme diagrama apresentado na Figura 6.

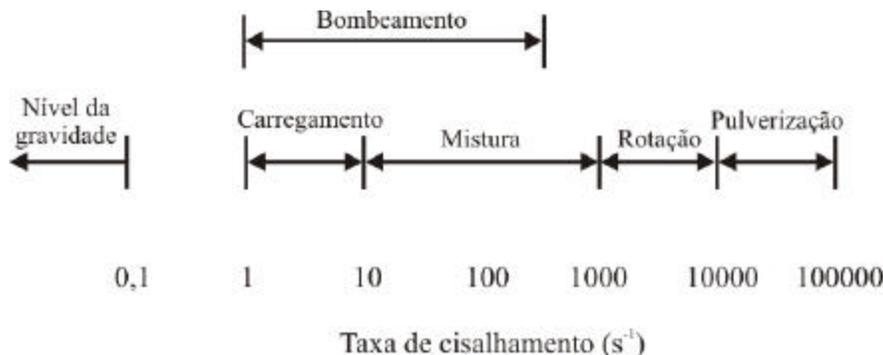


Figura 6 – Taxas de cisalhamento referentes ao processo de utilização do concreto (SAAK et al., 2001)

A incorporação de alguns materiais na produção do concreto pode afetar seu comportamento reológico. Banfill (1994) faz um levantamento dos principais fatores que afetam a reologia

das argamassas cujos efeitos são representativos do concreto. Os resultados do trabalho são apresentados na Tabela 1.

Tabela 1. – Efeitos de diferentes materiais na reologia de argamassas (BANFILL, 1994)

Ação	Efeito na tensão de escoamento	Efeito na viscosidade plástica
Aumento no volume de água	Redução	Redução
Aumento na quantidade de agregado miúdo	Aumento	Aumento
Aumento na quantidade de cimento	Aumento	Aumento
Aumento na finura do agregado miúdo	Aumento	Aumento / Sem efeito
Emprego de aditivo plastificante	Redução	Sem efeito
Emprego de aditivo incorporador de ar	Sem efeito	Redução
Substituição de parte do cimento por cinzas volantes	Redução	Redução
Substituição de parte do cimento por sílica ativa	Aumento	Redução

Emborg (1999) cita que a reologia é o meio mais preciso para descrever o comportamento real do concreto no momento do lançamento. A determinação das propriedades reológicas do concreto é feita por meio de equipamentos denominados reômetros, cujo procedimento de ensaio será descrito em seções posteriores.

Banfill (2003) apresenta resultados típicos de tensão de escoamento e viscosidade, para pasta , argamassa e concreto, que são:

- Pasta:  $\tau_0 = 10$  a  $100$  Pa,  $\eta = 0,01$  a  $1$  Pas;
- Argamassa:  $\tau_0 = 80$  a  $400$  Pa,  $\eta = 1$  a  $3$  Pas;
- CAA:  $\tau_0 = 50$  a  $200$  Pa,  $\eta = 20$  a  $100$  Pas.

## 2.4 Vantagens e aplicação

Dentre as principais vantagens do CAA que o tornam um material revolucionário para a construção de estruturas de concreto armado, pode-se destacar (BUI et al., 2002; EFNARC, 2002):

- alto desempenho no estado fresco e endurecido, representado pela alta deformabilidade, resistência à segregação, baixa permeabilidade, alta resistência mecânica e durabilidade, e melhor acabamento da superfície;
- eficiência econômica devido à facilidade de aplicação, levando a um aumento na velocidade de execução, e redução de mão-de-obra, energia e custos com equipamentos;
- melhoria nas condições ambientais, devido ao uso de adições provenientes de resíduos industriais, e à diminuição do ruído proveniente da vibração, garantindo melhores condições de trabalho;
- racionalização dos processos construtivos, permitindo maior liberdade nas formas e confecção de elementos estruturais com menores seções.

Nunes (2001) destaca ainda que a redução de custos observada no CAA pode ser decorrente: da redução da necessidade de aplainamento das superfícies devido à sua propriedade auto-nivelante nos elementos horizontais; e da menor necessidade de acabamento nas superfícies dos elementos verticais, que são suaves, uniformes, livres de imperfeições e sem descoloração quando se utilizam formas de boa qualidade e controle da técnica de aplicação.

Estas vantagens podem fazer do CAA um material economicamente viável, quando são considerados todos os aspectos referentes à sua aplicação. Por outro lado, uma avaliação econômica apenas da produção do material pode demonstrar altos custos, que são decorrentes dos diferentes tipos de materiais empregados na sua composição, como os aditivos, e do controle de qualidade necessário na produção. Segundo Ho et al. (2001), esse aumento de custo pode ser de até duas ou três vezes, em relação ao concreto convencional, dependendo da composição e do controle de qualidade na produção. O encarecimento do CAA pode ocorrer, por exemplo, quando se opta por utilizar uma pequena quantidade de adições, tendo, como consequência, um concreto com elevado consumo de cimento e, em alguns casos, a necessidade de se empregar aditivo promotor de viscosidade.

As características do CAA fazem com que o seu campo de aplicação consista especialmente de regiões onde há dificuldade de se proceder ao adensamento. Dentre as principais estruturas que se enquadram neste aspecto podem ser citados os elementos de formas complexas, de alta densidade de armadura ou regiões de difícil acesso. Sua aplicação também pode ser viável em obras muito grandes, aumentando a velocidade de construção, ou ainda quando é necessária uma redução no ruído produzido, o que é observado em construções localizadas em áreas urbanas (KHAYAT, 1999).

Em geral, o CAA pode ser aplicado em (NUNES, 2001; OKAMURA; OUCHI, 2003a):

- elementos de construção vertical (paredes estruturais ou não, pilares, etc.);
- regiões de elevado risco sísmico;
- trabalhos de reabilitação em áreas de difícil acesso e seções congestionadas;
- indústria de pré-moldados;
- CAA reforçado com fibras de aço, como é o caso de elementos de fundação, muros e lajes;
- pontes (ancoragens, arcos, vigas, torres, juntas);
- túneis;
- barragens;
- paredes diafragma;
- tanques.

Um destaque deve ser dado ao grande crescimento observado quanto à utilização do CAA em indústrias de pré-moldados de concreto. Estas indústrias apresentam grandes problemas relacionados ao processo de vibração e aos ruídos decorrentes da produção e aplicação do concreto convencional, problemas que podem ser minimizados com o CAA. Com relação à economia, apesar do maior custo do material, que, segundo Juvas (2004) é de 15 a 25% em relação ao concreto convencional, a redução total de custos, quando consideradas todas as etapas do sistema, é de 5 a 15%. Walraven (2003) aponta que há uma redução estimada em 10% no consumo de energia, devido à eliminação da vibração; maior durabilidade das formas, redução de cerca de 10% nos custos de manutenção; e redução das doenças dos trabalhadores, estimada em 10%. Além disso, a repetitividade de processos observada na indústria de pré-moldados favorece a implementação da produção do CAA, conforme cita Skarendahl (2003).

Por outro lado, a implantação do CAA em usinas de concreto, requer grandes adaptações e investimentos, levando a um aumento de custo de 1,5 vezes em relação ao concreto convencional (OKAMURA; OUCHI, 2003b). Isto decorre da necessidade de novas instalações para os diversos materiais empregados, diferentes formas de pesagem e dosagem, controle da granulometria e umidade dos agregados e controle da eficiência do processo de mistura. Segundo Walraven (2003), a maior dificuldade de aplicação do CAA in loco, em

relação à indústria de pré-moldados, está na falta de procedimentos definidos para o seu recebimento e controle de qualidade.

Ho et al. (2001) apresentam o conceito de construção “sanduíche”, que consiste no emprego de CAA e concreto convencional em um mesmo elemento estrutural. Este método construtivo é aplicável em elementos estruturais de grandes dimensões, em que as regiões de congestionamento de armaduras ocorrem em pequenas áreas, como é o caso de elementos de fundação e elementos pós-tensionados. Esta técnica pode levar a uma redução de custos em relação à opção de se usar CAA em toda a estrutura. Uma outra forma de construção “sanduíche”, citada por Okamura e Ouchi (2003a), consiste no emprego do novo material para o preenchimento de estruturas metálicas, como foi observado em um túnel imerso no Japão.

Dentre as estruturas executadas no Japão onde se utilizou o CAA, pode-se destacar a Ponte Akashi Straits, ponte de maior comprimento do mundo, que empregou o novo material na construção de duas ancoragens; e o maior tanque não enterrado do mundo, empregado para armazenagem de metano (Liquefied Natural Gas – LNG). Em ambas as aplicações, houve redução no tempo de execução, além de outras vantagens (OKAMURA, 1997; NUNES, 2001). Em outros países, destacam-se algumas aplicações como em túneis, pontes, pré-fabricados e reparos de estruturas (NUNES, 2001; GOMES, 2002; SHINDOH; MATSUOKA, 2003). Hwang et al. (2003) destacam o uso do CAA no reparo de pontes no Canadá, que ocorre desde 1997 na cidade de Quebec, e desde 2000 em Montreal. Este material foi escolhido devido à complexidade da operação, que apresenta um alto nível de restrições provocadas pelas armaduras, além da dificuldade de acesso observada em muitos casos.

### **3 PRODUÇÃO DO CONCRETO AUTO-ADENSÁVEL**

Os itens a seguir expõem os aspectos relacionados à produção do CAA, descrevendo as exigências para os materiais constituintes, os métodos de dosagem encontrados na literatura, e os cuidados que se devem tomar na sua confecção e aplicação.

#### **3.1 Materiais**

Para a produção do CAA requer-se a escolha rigorosa dos materiais empregados, com um controle dos fatores responsáveis pela garantia da fluidez desejada (SAAK et al., 2001). Este concreto é bastante sensível a algumas características dos materiais constituintes como, por exemplo, o tamanho e a forma dos agregados (SAAK et al., 2001; BUI et al., 2002). A distribuição granulométrica dos materiais deve ser contínua, de forma que as partículas menores preencham os vazios entre as maiores, a fim de evitar a obstrução do CAA diante de regiões estreitas.

Um ponto importante a ser observado é a necessidade de uma maior quantidade de finos, cuja principal contribuição se deve à adsorção de água promovida por sua elevada superfície específica, que contribui para garantir a viscosidade adequada. A especificação da EFNARC (2002) classifica como finos as partículas sólidas com dimensões menores que 0,125 mm, os quais podem ser constituídos por combinação entre cimento e adições (NUNES, 2001).

O maior consumo de finos no CAA, é acompanhado pela redução na quantidade de agregados empregados, especialmente do agregado graúdo. Isto faz com que as propriedades da argamassa sejam dominantes para a obtenção das características do concreto, sendo responsável pela lubrificação das partículas do agregado graúdo e pela estabilidade da mistura como um todo (DOMONE; JIN, 1999).

Além disso, 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 ajudar na estabilidade.

A seguir serão destacadas as características exigidas e as implicações dos materiais constituintes do CAA, que são: cimento, adições, aditivos, água e agregados.

### 3.1.1 Cimento

No CAA, há necessidade de se empregar uma grande quantidade de finos, que compreendem principalmente o cimento, porém, seu teor deve ser limitado para evitar efeitos indesejados, como alta liberação de calor de hidratação e aumento da retração plástica, além do alto custo que este insumo representa na composição final. A EFNARC (2002) determina um limite máximo de 500 kg de cimento para controlar a retração, e um mínimo de 350 kg. Este teor pode ser reduzido ao se empregar um outro material cimentício. Em virtude deste fato, no CAA é comum utilizar-se os cimentos em conjunto com algumas adições, cimentícias ou não, podendo-se formar combinações binárias (cimento + um tipo de adição) ou ternárias (com dois tipos de adição).

Dentre as principais características do cimento que devem ser avaliadas na produção do CAA, deve-se destacar sua finura e a capacidade de adsorver o aditivo superplastificante. Em se tratando da finura dos cimentos, Nunes (2001) afirma que, quanto maior a superfície específica, menor é a tensão de escoamento e maior a viscosidade da mistura. Isto decorre do aumento da quantidade de partículas em contato com a água, diminuindo a distância e aumentando a frequência de colisão entre elas. Neville (1997) destaca ainda que cimentos mais finos apresentam elevada velocidade de hidratação contribuindo para um rápido ganho de resistência.

Com relação à adsorção do aditivo pelo cimento, Jolicoeur e Simard (1998) indicam que ela se dá preferencialmente nos aluminatos ( $C_3A$  e  $C_4AF$ ), por isso, recomenda-se o emprego de cimentos com uma quantidade moderada destes compostos, para que ocorra uma adsorção mais uniforme em toda a superfície dos grãos. O teor de  $C_3A$  no cimento deve ser preferencialmente menor que 10% em massa (EFNARC, 2002), permitindo sua maior ação dispersante e uma menor perda de fluidez.

A liberação de calor por hidratação ocorre como consequência da reação do cimento anidro com a água e, quando em grande quantidade, pode causar fissuração do concreto. Segundo Neville (1997), a velocidade de liberação do calor de hidratação depende da composição química do cimento, sendo o  $C_3S$  e o  $C_3A$  os compostos que hidratam mais rapidamente, liberando mais calor. Além disso, indica que esta evolução do calor liberado é também intensificada em cimentos de maior finura. Mehta e Monteiro (1994) citam que cimentos ricos em  $C_2S$  apresentam baixa liberação de calor e endurecimento lento, levando a baixos níveis de

resistência nas primeiras idades, sendo classificados como cimentos Portland de Baixo Calor de Hidratação.

Encontra-se na literatura, um número expressivo de publicações empregando o cimento Tipo I da ASTM C 150<sup>1</sup>, com finura (Blaine) de 360 m<sup>2</sup>/kg na confecção de CAA. Alguns autores utilizam também cimentos compostos, cujos principais são o cimento Portland com escória de alto-forno<sup>2</sup>, e cimentos Portland pozolânicos tipos P e IP<sup>3</sup> (ASTM C 595). Nawa et al. (1998 apud NUNES, 2001) destaca o cimento estabilizado mecanicamente, misturando partículas grossas de clínquer com partículas mais finas, promovendo melhoria das características granulométricas.

Um estudo desenvolvido por Tanaka et al. (1998) apresenta um tipo diferente de cimento, chamado cimento esférico, que se caracteriza pela forma arredondada de suas partículas e pela pequena quantidade de grãos com dimensão menor que 3 µm, se comparado ao cimento Portland comum. Segundo os autores, estas características podem levar a melhoria da fluidez dos concretos, devido ao maior aproveitamento da água, garantido pela forma arredondada, e redução na hidratação inicial, promovida pela menor quantidade das partículas mais finas. Além disso, observa-se uma alteração na superfície dos grãos, que ficam envolvidos por gipsita, a qual vai disputar com os aditivos superplastificantes a adsorção pelas fases C<sub>3</sub>A e C<sub>4</sub>AF do cimento. Isto contribui para a redução do teor de aditivo empregado, fazendo com que este cimento seja uma alternativa para aplicação em CAA.

Stark e Gathemann (2004) apresentam também um cimento composto por diferentes tipos de aglomerantes, os quais são ajustados em relação ao tipo, quantidade e finura, além de fíler calcário ultrafino. O cimento é denominado CEM II/A-LL 42,5 R, e seus constituintes são especificados segundo as normas alemãs - DIN (Deutsches Institut für Normung). Este material demonstrou boas características para aplicação em CAA, quando comparado com a utilização de um cimento comum. Isto foi evidenciado especialmente em termos das propriedades mecânicas, observando-se aumento da resistência à compressão e bons resultados de durabilidade.

---

<sup>1</sup> O cimento Tipo I da ASTM C 150 é semelhante ao CPI da NBR 5732

<sup>2</sup> Cimento IS pela ASTM C 595, com finura de aproximadamente 400 m<sup>2</sup>/kg, e CP III pela NBR 5735

<sup>3</sup> Equivalente ao cimento brasileiro CP IV da NBR 5736

### 3.1.2 Adições

As adições são materiais de origem mineral, finamente moídos, que são incorporados ao concreto em teores elevados, com a finalidade de se obter características específicas. Podem ser provenientes de sub-produtos da indústria metalúrgica, que não são facilmente recicláveis e, por isso, representam um grande problema ambiental (MOOSBERG-BUSTNES, 2003). As adições são empregadas em substituição ao cimento, cujos teores usuais de substituição encontrados na literatura para o CAA são de 30%, ou em cimentos compostos, de forma que os efeitos sobre o concreto são semelhantes em ambos os casos (MEHTA; MONTEIRO, 1994).

As adições são classificadas conforme sua ação no concreto em:

- inertes – promovem uma ação física por meio da maior compacidade, como é o caso do filler calcário e pós de quartzo;
- reativas – contribuem para a formação dos hidratos. Estas se subdividem em pozolanas, podendo-se citar cinza volante com baixo teor de cálcio, cinza da casca do arroz, sílica ativa e metacaulin; ou cimentantes, como por exemplo, a escória de alto forno. Algumas podem ainda ser pozolânicas e cimentantes, como é o caso da cinza volante com elevado teor de cálcio.

Segundo a recomendação da EFNARC (2002), tanto as adições inertes quanto as reativas podem ser utilizadas na produção do CAA.

Dentre os benefícios alcançados pelo uso de adições minerais ao concreto, Mehta e Malhotra (1996) destacam:

- Benefícios econômicos – quando as adições são empregadas em substituição parcial ao cimento, observa-se uma redução do custo final, devido ao menor consumo de cimento;
- Benefícios ambientais – a maioria das adições é constituída de resíduos industriais, e seu uso em concreto evita que sejam lançados no ambiente. Além disso, seu uso em substituição ao cimento reduz a produção de clínquer, e com isso, o lançamento de CO<sub>2</sub> na atmosfera;
- Melhora das propriedades do concreto no estado fresco – as principais vantagens são conseguidas em termos de fluidez, com uma redução da quantidade de água e aumento da resistência à exsudação e segregação, sendo influenciadas pela distribuição granulométrica, forma e textura das partículas.

- Melhora das propriedades do concreto no estado endurecido – são obtidas melhoras na resistência mecânica, permeabilidade e durabilidade, devido ao refinamento dos poros, e resistência à fissuração térmica, proporcionada pelo seu baixo calor de hidratação. Observa-se grande influência da composição mineralógica, dimensão do grão e área específica das adições.

Dentre as desvantagens do uso destes materiais no concreto, Malhotra (1987) destaca a possibilidade de ocorrer retardo de pega e aumento na retração. Poppe e Schutter (2003) citam ainda que, grandes quantidades de finos podem levar ao desenvolvimento de um alto calor de hidratação, com surgimento de fissuras. Este efeito pode ser reduzido quando se empregam adições inertes.

O uso de adições no CAA é importante, principalmente, para suprir a necessidade de se ter uma maior quantidade de partículas finas, tendo em vista sua contribuição para a redução da fricção entre os agregados e para o aumento da viscosidade e, conseqüentemente, da resistência à segregação. Além disso, a otimização promovida na distribuição granulométrica dos sólidos, com as partículas menores preenchendo os espaços existentes entre as partículas maiores, exerce uma grande contribuição para a fluidez do material (ESPING, 2003). Sonebi et al. (2003) citam ainda que a incorporação de finos reduz a quantidade de aditivo superplastificante necessária para se obter a mesma deformabilidade de um concreto produzido apenas com cimento.

O desempenho das adições depende das suas características de granulometria, forma da partícula, textura superficial, área superficial específica e reatividade. Estes fatores exercem maior influência nas propriedades do concreto no estado fresco, sendo que as partículas rugosas, angulares e alongadas exigem maior volume de pasta que as lisas e arredondadas. (MOOSBERG-BUSTNES, 2003).

Petersson (1999) cita a importância de se evitar o uso de adições cuja curva de distribuição granulométrica seja semelhante à do cimento, devendo-se optar por curvas que apresentem uma menor inclinação. Este parâmetro pode ser avaliado por meio do fator de inclinação, que é definido como o quociente entre o diâmetro correspondente a 50% das partículas e o diâmetro correspondente a 80% das partículas, sendo esta a porcentagem retida acumulada na curva de distribuição granulométrica (RÜDIGER WERNER TECHNICAL SERVICES LABORATORY, 1998). Para atender a recomendação, deve-se empregar curvas com fator de inclinação maior ou igual a 2, as quais são caracterizadas por um intervalo maior de variação das dimensões.

A seguir, serão apresentados algumas características particulares e os efeitos das adições mais empregadas, segundo a literatura, para a produção de CAA. Observa-se que, muitas vezes, elas são utilizadas em conjunto, formando misturas com combinação de dois ou até três tipos de adições, além do cimento.

### 3.1.2.1 Cinza volante

De acordo com o ACI 116R (1996), a cinza volante consiste em um resíduo finamente dividido proveniente da combustão do carvão mineral. Pode ser classificada de acordo com sua composição, conforme especificação da ASTM C 618 (2003), em dois tipos: cinza volante classe C, que apresenta alto teor de cálcio, e cinza volante classe F, cujo teor de cálcio é reduzido. Isto faz com que a cinza da classe C possua características cimentantes, além das propriedades pozolânicas.

As características físicas referentes à forma, finura, distribuição granulométrica, densidade e composição química da cinza, exercem influência nas propriedades do concreto tanto no estado fresco, quanto no estado endurecido. A maior parte das partículas são vítreas e de forma esférica, com dimensões variando de menos de 1  $\mu\text{m}$  até mais de 1 mm, dependendo da técnica de obtenção do material. Para serem usadas como adição em concretos, a maior parte das partículas deve possuir dimensão inferior a 45  $\mu\text{m}$  (ACI 226R, 1996).

As principais conseqüências do emprego da cinza volante nas propriedades do concreto no estado fresco são:

- redução da demanda de água para uma fluidez específica;
- maior coesão;
- redução da exsudação e segregação;
- maior fluidez e bombeabilidade devido à redução do atrito entre as partículas dos agregados, promovida pela forma esférica da cinza, o que representa uma importante qualidade na produção de CAA;
- maior tempo de pega, e, conseqüentemente, menor taxa de evolução do calor.

No estado endurecido, o principal efeito da cinza é a redução da resistência à compressão observada nas primeiras idades e, em menor intensidade, do módulo de elasticidade, o que pode ser melhorado pela incorporação de sílica ativa ou pela redução da relação água/materiais cimentícios decorrente do uso de aditivos superplastificantes.

Xie et al. (2002) citam que a ação da cinza volante no CAA é semelhante à promovida por um agente de viscosidade, no que diz respeito ao aumento da viscosidade sem comprometimento da fluidez, e à maior manutenção da consistência ao longo do tempo. Os autores definem que a finura adequada da cinza está entre 500 e 600 m<sup>2</sup>/kg e propõem o emprego de uma cinza ultrapulverizada com Blaine variando entre 330 e 1100 m<sup>2</sup>/kg.

### 3.1.2.2 Sílica ativa

A sílica ativa consiste em um subproduto da fabricação do silício metálico, das ligas de ferro-silício e de outras ligas de silício. Caracteriza-se por sua estrutura amorfa, assemelhando-se à forma esférica, com diâmetros variando de menos de 0,1 µm até 1 ou 2 µm, ou seja, partículas 100 vezes menores que as do cimento. Possui ainda um teor de SiO<sub>2</sub> entre 85 e 90%, massa específica de 2,2 g/cm<sup>3</sup> e área específica de 15.000 a 25.000 m<sup>2</sup>/kg (MEHTA; MONTEIRO, 1994; AÏ TCIN, 2000).

Dentre os efeitos da sílica ativa nas propriedades do concreto no estado fresco pode-se destacar:

- maior coesão, garantindo misturas mais estáveis;
- drástica redução da exsudação, devido ao tamanho reduzido das partículas;
- aumento na demanda de água;
- redução da retração plástica;
- aumento da fluidez do concreto;
- redução do calor de hidratação, acompanhado de um aumento nos níveis de resistência à compressão, tendo em vista a maior densificação da matriz de cimento;
- redução da permeabilidade, garantindo maior durabilidade às estruturas.

Os teores usuais de emprego da sílica em substituição ao cimento, para a produção do CAA, são de 5 a 8%. Estudos demonstram que a elevada finura e forma arredondada da sílica, geram um maior consumo de aditivo superplastificante, especialmente devido ao efeito de aumento da tensão de escoamento do CAA (TAKADA et al., 1999).

### 3.1.2.3 Escória de alto-forno

A escória de alto-forno corresponde ao produto não-metálico, constituído essencialmente de silicatos e aluminosilicatos de cálcio e de outras bases, resultante da manufatura do ferro-gusa

num alto-forno (AÏ TCIN, 2000; ACI 233R, 1996). Após a moagem, a granulometria da escória pode ser bastante variada, porém, é ideal que a maior parte de suas partículas apresentem dimensões menores que 45 µm, que corresponde a uma área específica pelo método Blaine de 500 m<sup>2</sup>/kg. Isto é importante para que a escória possa contribuir positivamente na qualidade dos concretos, especialmente em relação à resistência à compressão, conforme indica Mehta e Monteiro (1994).

O teor de escória deve ser determinado de acordo com a aplicação do concreto, a temperatura de cura e o tipo de cimento, sendo normalmente empregada uma proporção em massa de 25 a 70% do total de materiais cimentícios (ACI 233R, 1996). É comum o uso da escória em combinação com cimento e pozolanas, como a cinza volante e a sílica ativa, formando um sistema ternário capaz de permitir maior economia, resistência à compressão e durabilidade.

Em termos de propriedades do concreto no estado fresco, a escória promove: maior fluidez, devido ao elevado teor de pasta das misturas; maior viscosidade da pasta; maior tempo de pega e menor exsudação (MALHOTRA, 1987; ACI 233R, 1996). Estas propriedades demonstram que o uso da escória pode trazer benefícios quanto à obtenção das propriedades requeridas para o CAA.

No caso do concreto no estado endurecido, a ação da escória depende de alguns fatores como a relação água/materiais cimentícios, tipo de cimento e condições de cura. Em geral, observa-se uma redução da resistência à compressão nas primeiras idades com um aumento nas idades avançadas (MALHOTRA, 1987; ACI 233R, 1996).

#### 3.1.2.4 Fíler calcário

O fíler calcário caracteriza-se como um pó fino, proveniente da rocha calcário. Pode ser classificado como calcítico ou dolomítico, dependendo de sua composição química. O calcário calcítico é aquele em que predomina a calcita, mineral composto basicamente de carbonato de cálcio (CaCO<sub>3</sub>). O calcário dolomítico, por sua vez, é gerado a partir substituição de parte do cálcio existente na calcita, por magnésio, formando a dolomita (CaMg(CO<sub>3</sub>)<sub>2</sub>), num processo chamado de dolomitização (DANA, 1993).

O maior emprego do calcário calcítico está na produção do cimento Portland, que possui 75% de carbonato de cálcio na sua composição. No caso do calcário dolomítico, uma importante aplicação se dá na correção da acidez dos solos, devido ao teor de óxido de magnésio (MgO), que é superior a 12% (DOLOMITA DO BRASIL, 2005). Por outro lado, este alto teor de

magnésio constitui um problema com relação à utilização do fíler dolomítico em concreto, por comprometer a durabilidade em função do risco de ocorrer reação álcali-carbonato e expansão (EFNARC, 2002; NEVILLE, 1997).

Taylor (1990) indica que a ação do fíler calcário se dá tanto por meio de um efeito físico como químico, de forma que não constitui um material completamente inerte, como se tem definido. O efeito físico ocorre devido à sua finura, que era um bom preenchimento dos vazios. Em relação à ação química, a atuação do fíler se dá principalmente durante a hidratação do cimento nas primeiras idades, funcionando como agente de nucleação para a produção de CH e CSH, além de acelerar a hidratação dos minerais do clínquer, especialmente o  $C_3S$ , contribuindo para o aumento da resistência à compressão (BOSILJKOV, 2003). O fíler participa da reação de hidratação do cimento, especialmente naqueles com alto teor de  $C_3A$ , por meio da produção do monocarboaluminato de cálcio -  $C_4A\bar{C}H_1$  (CHATTERJEE, 2001).

No estudo realizado por Bosiljkov (2003) em pastas de cimento mostra ainda que, aumentando o teor de substituição de fíler, em relação ao cimento, de 25 para 50%, há um importante incremento na deformabilidade. Sonebi et al. (2003) indicam que, a utilização de grandes quantidades de fíler, pode também diminuir a ocorrência de exsudação no concreto, enquanto que a mesma observação foi feita por Petersson (1999), em relação à segregação.

Alguns estudos demonstraram que o fíler calcário possui superfície dotada de estrias e sua forma é mais ou menos retangular. Isto o coloca em uma situação intermediária em relação às outras adições, pois sua forma é menos regular que a da escória granulada, e mais regular quando comparado ao pó-de-pedra, por exemplo (MOOSBERG-BUSTNES, 2003; SHEINN et al., 2003). Quanto mais regular a forma da adição, menor será a demanda de água e a porosidade da mistura.

Ao analisar diferentes tipos de fíler na produção de argamassas de CAA, Esping (2003) verificou que, quanto maior a área específica do material, maior é a demanda de água necessária para que se atendam os requisitos exigidos em relação à auto-compactabilidade e reologia. Isto demonstra que, mantendo-se constante o teor de água das misturas, quanto mais fino for o fíler, há necessidade de se empregar um maior teor de aditivo superplastificante para que sejam atingidas as mesmas características de deformabilidade. Isto também ocorre devido à pequena manutenção de fluidez provocada pelo fíler, que deve ser combatida pelo aumento no teor de aditivo (DOMONE; JIN, 1999). Heirman e Vandewalle (2003)

produziram concretos com diferentes tipos de fíler calcítico e um fíler dolomítico, e obtiveram áreas específicas variando de 294 a 1115 m<sup>2</sup>/kg para o primeiro material, e 236 m<sup>2</sup>/kg, para o segundo.

Um estudo desenvolvido por Shoya et al. (1999) comparou um concreto produzido com fíler calcário e outro empregando aditivo promotor de viscosidade em substituição à adição. A avaliação se deu por meio de medidas de deformabilidade (*Slump flow*) e fluidez (Funil-V), além da avaliação das propriedades reológicas (tensão de escoamento e viscosidade). Os resultados obtidos comprovaram que o fíler é mais eficiente em relação a deformabilidade do CAA, pois levou a misturas com maior espalhamento, atingido no ensaio do *Slump flow*, e menor tensão de escoamento. Já com relação à viscosidade, que pode também ser avaliada pelo Funil-V, não se observaram diferenças significativas entre os dois materiais.

### 3.1.3 Agregados

Para garantir um nível adequado de adensabilidade no CAA, é necessário reduzir a quantidade de agregado graúdo em função de um aumento no teor de partículas finas. O volume total de agregados e a proporção entre agregados miúdo e graúdo são os principais aspectos que podem influenciar na reologia do concreto. Um estudo desenvolvido por Okamura e Ouchi (2003a) apresenta a relação entre a razão do volume de agregados miúdo e graúdo pelo volume total de sólidos na argamassa e no concreto, respectivamente, definindo o que os autores chamam de grau de adensamento dos agregados. A Figura 7 apresenta as relações obtidas para um concreto normal, um CAA e um concreto compactado com rolo (CCR). O estudo concluiu que, para o CAA, o grau de adensamento do agregado graúdo deve ser de 50% e no caso do agregado miúdo de 60%.

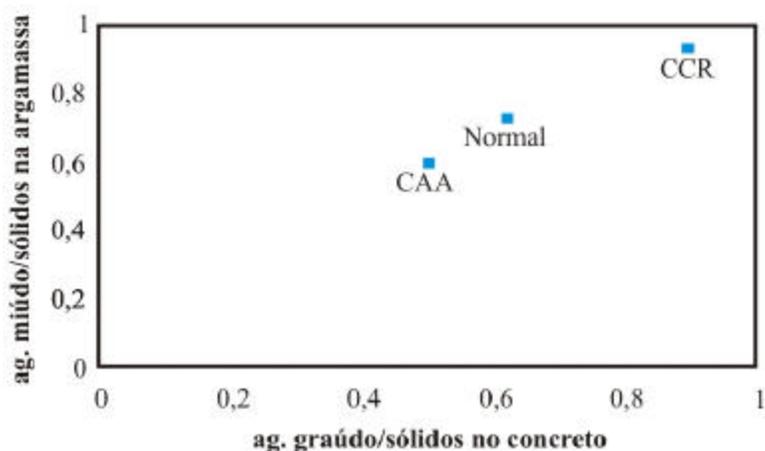


Figura 7 – Grau de adensamento do agregado miúdo na argamassa e do agregado graúdo no concreto (OKAMURA; OUCHI, 2003a)

Conforme descrito na especificação da EFNARC (2002), todos os tipos de agregados, miúdos ou graúdos, utilizados em concretos convencionais, são adequados para o emprego em CAA. Nos parágrafos seguintes, apresentam-se alguns aspectos relevantes nas características destes materiais que podem promover efeitos significativos sobre algumas propriedades da mistura.

#### Forma e textura

A forma e a textura dos agregados são características que exercem grande influência nas propriedades do concreto no estado fresco. Suas partículas podem apresentar diferentes formas conforme a natureza da rocha mãe e as ações de desgaste a que foram submetidas durante o processo de obtenção. Esta classificação engloba desde as arredondadas, em que houve erosão completa; até as alongadas e angulosas, que apresentam arestas vivas. Partículas arredondadas promovem uma redução na porcentagem de vazios devido ao seu melhor adensamento, apresentam também uma menor área específica volumétrica (relação entre a área da superfície e o volume), o que pode levar a uma melhora na fluidez. Por isso, limita-se a proporção de partículas alongadas ou lamelares em 10 a 15% (NEVILLE, 1997). Partículas de textura áspera e forma angulosa ou alongada requerem uma maior quantidade de pasta para que seja possível se produzir misturas trabalháveis, aumentando o custo do concreto (MEHTA; MONTEIRO, 1994).

### Granulometria

Um importante aspecto a ser definido em relação aos agregados empregados no CAA diz respeito a granulometria. Chen et al. (2003) cita que, quando a distribuição granulométrica dos agregados não é contínua, podem ocorrer alguns problemas no concreto, como:

- maior consumo de cimento, levando a um aumento no custo do concreto;
- redução da fluidez;
- existência de mais vazios entre os agregados.

Conforme descreve Neville (1997), os principais fatores afetados pela granulometria são a área superficial dos agregados, o volume relativo ocupado pelas partículas, a trabalhabilidade da mistura e a tendência à segregação. Agregados com granulometria descontínua levam a uma maior tendência à segregação. Estes tipos são recomendados para misturas de baixa fluidez, adensadas por vibração, sendo, portanto, desaconselhadas para o uso em CAA.

### Área superficial

A área superficial do agregado determina a demanda de água necessária para molhar os sólidos. Quanto menor o seu valor, menores as quantidades de pasta e água necessárias para se obter concretos com maior fluidez (NEVILLE, 1997).

### Diâmetro médio e distância entre partículas

Deve-se atentar também para o diâmetro médio do agregado e a distância entre suas partículas, que vão influenciar no volume de pasta necessário para preencher os vazios e envolver cada grão, conforme ilustra a Figura 8. A Equação 2 é empregada para a determinação do diâmetro médio em função da distribuição granulométrica dos agregados, e a Equação 3 é utilizada para a determinação da distância média interpartícula (BUI et al., 2002).

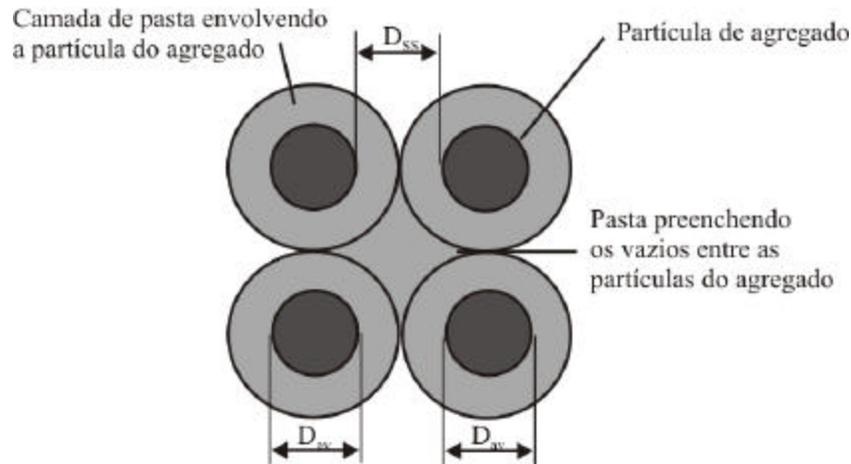


Figura 8 – Diâmetro médio e distância interpartícula dos agregados (BUI et al., 2002)

$$D_{av} = \frac{\sum d_i \cdot m_i}{\sum m_i} \quad (2)$$

$$D_{ss} = D_{av} \cdot \left\{ \sqrt[3]{1 + \frac{V_p - V_{oid}}{V_c - V_p}} - 1 \right\} \quad (3)$$

Nestas equações,  $d_i$  = dimensão média da fração de agregado;  $m_i$  = porcentagem da massa de agregado retida entre as peneiras superior e inferior da fração  $i$ ;  $V_p$  = volume de pasta;  $V_{oid}$  = volume de vazios entre o conjunto compactado dos agregados;  $V_c$  = volume total de concreto.

### Massa específica

Neville (1997) indica que a massa específica de um agregado comum é de aproximadamente  $2,6 \text{ kg/dm}^3$ . Agregados com massa específica inferior a este valor podem ser classificados em leves, enquanto que aqueles com massas específicas bem mais altas, geralmente acima de  $4 \text{ kg/dm}^3$  são considerados pesados. Observa-se que concretos com elevada fluidez que empregam agregados leves podem apresentar segregação devido à flutuação das partículas maiores. Estes agregados apresentam uma elevada e rápida absorção, fazendo com que parte da água adicionada não contribua para a fluidez da mistura, podendo gerar ainda uma perda acentuada de consistência (MEHTA; MONTEIRO, 1994). Por isso, recomenda-se que, quando possível, o agregado leve seja pré-saturado antes da mistura. No caso de concretos confeccionados com alguns tipos de agregados graúdos pesados, há uma maior tendência à segregação devido a grande diferença entre sua massa específica e a da argamassa.

### 3.1.3.1 Agregado miúdo

Yurugi e Sakai (1998) definem que, para garantir a qualidade na produção do CAA, deve-se atentar para um controle rigoroso na umidade do agregado miúdo, que consiste em uma das principais causas na variação da fluidez da mistura. Os autores indicam que uma alternativa para minimizar esta influência seria o uso de aditivos promotores de viscosidade, que tornam a mistura mais estável em relação às variações na umidade do agregado. Um estudo desenvolvido por Aarre e Domone (2003) demonstrou que, um erro de 0,5% na estimativa da umidade dos agregados, pode alterar o consumo de água em  $8 \text{ kg/m}^3$  de concreto, e modificar o resultado do ensaio de espalhamento (*Slump flow*) em 45 mm, esta relação pode ser visualizada na Figura 9.

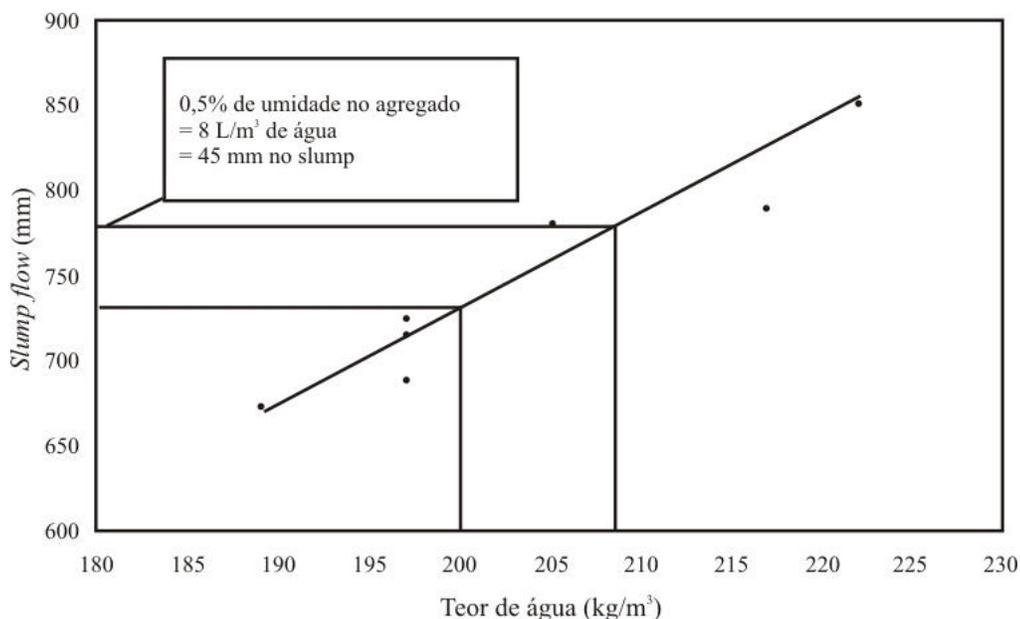


Figura 9 – Relação entre *Slump flow* e teor de água de uma mistura de concreto (AARRE e DOMONE, 2003)

Quanto ao teor de agregado miúdo a ser empregado, deve-se optar por volumes baixos, de modo a se evitar o contato direto entre as partículas, o qual pode ocasionar redução na deformabilidade do CAA, mesmo que se garanta uma viscosidade adequada da pasta. Dentre os trabalhos sobre CAA encontrados na literatura, nota-se que o volume de agregado miúdo nas argamassas varia entre 40 e 50% (DOMONE; JIN, 1999; EDAMATSU et al., 2003; KHAYAT; GHEZAL, 2003; OKAMURA, 1997).

Algumas características físicas dos agregados miúdos podem influenciar na deformabilidade da argamassa, quando submetida a tensões de cisalhamento. Estas tensões são provocadas pela proximidade entre o agregado graúdo e as partículas da argamassa, gerada pela

deformação do concreto em regiões restritas. Quanto maior o teor de agregado miúdo e a angulosidade das suas partículas, maior é a resistência ao cisalhamento da argamassa, dificultando a deformabilidade da mistura (OKAMURA; OUCHI, 2003a; OUCHI; EDAMATSU, 1999).

Com relação à forma e textura do agregado miúdo, observa-se um efeito significativo quanto à demanda de água de amassamento. As areias provenientes de depósitos eólicos, zonas marítimas e leitos dos rios, são mais arredondadas e, portanto, apresentam melhor desempenho em termos de fluidez. Por outro lado, nas areias artificiais encontra-se uma grande quantidade de grãos alongados que levam a produção de um concreto muito áspero, que necessita de mais pasta (MEHTA; MONTEIRO, 1994; PETERSSON, 1999).

A área específica total da areia está relacionada com a sua granulometria, sendo muito influenciada pelo teor de partículas menores que 600  $\mu\text{m}$ . Para que a mistura seja satisfatoriamente trabalhável, deve haver uma quantidade suficiente de partículas menores que 300  $\mu\text{m}$ . Portanto, em misturas apresentando um volume alto de cimento, pode-se reduzir o teor de areia fina (NEVILLE, 1997). Além disso, Bartos (1999 apud HODGSON, 2003) alerta que areias muito grossas podem levar à ocorrência de segregação, devendo ser evitadas para uso em CAA. Mesmo garantindo-se uma granulometria adequada do agregado miúdo, o desempenho do CAA também depende da granulometria e da forma do agregado graúdo.

### 3.1.3.2 Agregado graúdo

A influência do agregado graúdo na fluidez do concreto está relacionada ao espaço existente entre obstáculos, representados pelas armaduras, e pela distância entre a armadura e a face das fôrmas, sendo fortemente decorrente da sua granulometria (OKAMURA; OUCHI, 2003a). Para se evitar o bloqueio das partículas do agregado graúdo na passagem do concreto por regiões estreitas, é necessário que o seu teor seja reduzido (EDAMATSU et al., 2003). Em geral, o agregado graúdo utilizado no CAA deve ser mais arredondado, possuir distribuição granulométrica bem graduada, e menor dimensão do que o agregado utilizado no concreto convencional, sendo estes fatores responsáveis pelo aumento da fluidez, deformabilidade e resistência à segregação (HODGSON, 2003).

A forma do agregado graúdo também exerce grande influência sobre a fluidez do concreto, conforme apresentado anteriormente. Segundo a EFNARC (2002), quanto mais arredondados forem os grãos, é possível se empregar um volume maior deste material. Neville (1997) cita

que no caso de se empregar agregados com forma mais angular, deve-se aumentar o volume de pasta a fim de garantir a obtenção do CAA com as características adequadas.

A especificação da EFNARC (2002) estabelece que a dimensão máxima para o CAA normalmente deve variar entre 16 e 20 mm, sendo que dimensões menores permitem que se utilize um volume maior de agregado. Para a definição da dimensão máxima, deve-se analisar a distância existente entre os obstáculos, pois se o contato entre as partículas exceder um limite determinado, o bloqueio é inevitável, independentemente da viscosidade da mistura (OKAMURA, 1997). Observa-se que partículas angulares, com superfície áspera, devem ter uma granulometria mais fina para reduzir esta possibilidade de intertravamento e assim compensar o atrito elevado (NEVILLE, 1997).

### **3.1.4 Água**

Quanto maior a quantidade de água no concreto, menor é a tensão de escoamento (relacionada com a deformabilidade) e menor é viscosidade da mistura. Porém, elevados teores de água podem comprometer a sua resistência mecânica. Para se garantir as condições de fluidez sem afetar aspectos de resistência e durabilidade, parte da água pode ser substituída pela utilização de aditivos superplastificantes.

### **3.1.5 Aditivos**

De acordo com o ACI 212.3R (1996), os aditivos são materiais empregados em concretos e argamassas com o propósito de modificar suas propriedades, tornando-os mais adequados em termos de trabalho, manuseio, economia ou outros fins.

No caso do CAA, os aditivos representam materiais de extrema importância, podendo-se destacar os superplastificantes, que são indispensáveis para garantir as principais características do estado fresco. Estes aditivos são os responsáveis pela elevada fluidez da mistura devido à sua capacidade de redução de água, o que os torna adequados para concretos aplicados em áreas com pequena acessibilidade ou com alta densidade de armadura, além de serem capazes de promover um aumento na sua bombeabilidade (RONCERO, 2000).

Utilizam-se também, em alguns casos, aditivos promotores de viscosidade, os quais garantem viscosidade e coesão adequadas à mistura, evitando-se a tendência à segregação. Estes aditivos são constituídos basicamente de polímeros solúveis em água.

Podem ainda ser utilizados aditivos incorporadores de ar, retardadores ou aceleradores de pega, entre outros, conforme a necessidade do produto final. A seguir, serão apresentados os principais tipos e características dos superplastificantes e dos agentes de viscosidade.

### 3.1.5.1 Superplastificantes

Segundo Ramachandran et al. (1998), superplastificantes são aditivos químicos capazes de manter uma adequada trabalhabilidade do concreto fresco sob baixa relação água/cimento, por um período de tempo razoável, sem afetar as propriedades de pega e endurecimento. Estes aditivos são também conhecidos como redutores de água, devido à sua característica de reduzir a quantidade de água empregada na mistura mantendo a mesma fluidez, ou ainda de aumentar a fluidez sem um acréscimo de água (ACI 212.4R, 1996; AÏ TCIN et al., 1994). Em relação à estrutura química, os superplastificantes usados na indústria do concreto são basicamente surfactantes poliméricos com uma elevada massa molecular e um grande número de unidades moleculares que são repetidas em uma certa seqüência (RONCERO, 2000).

A capacidade de redução de água dos aditivos superplastificantes se deve ao impedimento da floculação das partículas de cimento. Quando são misturados apenas cimento e água, os grãos de cimento tendem a formar uma estrutura floculada que aprisiona parte da água adicionada (AÏ TCIN, 2000). Esta floculação promove um aumento na tensão de escoamento e na viscosidade plástica. A água aprisionada fica impedida de exercer sua função de aumento da fluidez da mistura, gerando porosidade dentro da pasta hidratada, a qual vai tornar o material menos durável. Os superplastificantes atuam basicamente na defloculação e dispersão das partículas de cimento, garantindo desta forma um maior aproveitamento da água (AÏ TCIN et al., 1994).

Os primeiros aditivos redutores de água surgidos no mercado foram os dispersantes poliméricos à base de lignosulfonatos, que são derivados da lignina proveniente da indústria de celulose e papel. Estes aditivos, de baixo custo e processamento simples, são capazes de promover uma redução de água de 5 a 10% (AÏ TCIN, 2000), sendo por isso, conhecidos como plastificantes. No entanto, os lignosulfonatos podem apresentar algumas impurezas, como açúcares, que são responsáveis por promover alguns problemas como retardo de pega e incorporação excessiva de ar (AÏ TCIN et al., 1994). A partir destes inconvenientes surgem os aditivos superplastificantes, os quais consistem em polímeros sintéticos, cuja capacidade de redução de água é de até 30%, sendo também conhecidos como redutores de água de elevada eficiência. Os aditivos superplastificantes podem ser de dois tipos: os de 2ª geração,

constituídos de polímeros sintéticos sulfonados, e os de 3ª geração, que são os policarboxilatos.

Os aditivos superplastificantes de 2ª geração são divididos em dois grupos: polinaftalenos sulfonados, provenientes da naftalina, que corresponde a um subproduto da indústria petrolífera; e polimelaminas sulfonadas, provenientes da melamina. Estes aditivos são caracterizados por suas cadeias, com grupos funcionais mais homogêneos, e por seu modo de ação, que se dá por uma repulsão eletrostática induzida nos grãos de cimento. Quando estes aditivos são dissolvidos na mistura, há uma liberação dos íons empregados para sua neutralização, os quais vão envolver os grãos de cimento, conferindo-lhes uma carga elétrica negativa que resultará em sua repulsão (RONCERO, 2000). Aï tcin (2000) cita que as melaminas, em comparação aos naftalenos, promovem um menor retardo de pega e incorporação de ar, possuem um desempenho muito constante, e apresentam menos risco em caso de superdosagem. Por outro lado, os naftalenos possuem um teor de sólidos maior, permitindo melhor aproveitamento, e são mais baratos.

Os policarboxilatos, também chamados de poliacrilatos, são moléculas poliméricas de cadeias muito longas, capazes de promover um efeito bastante eficiente na repulsão dos grãos de cimento. Isto é possível graças ao seu mecanismo de ação que se dá principalmente por repulsão estérica, que corresponde a uma barreira física formada pelas longas cadeias do aditivo ao redor dos grãos de cimento, impedindo o contato e a conseqüente floculação (RONCERO, 2000).

Segundo Nunes (2001), os superplastificantes mais recomendados para o uso em CAA são os policarboxilatos, por permitirem maior redução de água, maiores resistências iniciais, e manutenção da fluidez por um tempo prolongado, em relação aos outros aditivos. Hwang et al. (2003) afirmam que, em misturas com a mesma relação água/finos, os aditivos à base de naftaleno apresentam maior consumo que os policarboxilatos, para garantir os mesmos níveis de fluidez. Apesar disto, diversos autores utilizam aditivos à base de naftaleno, como é o caso de: Khayat (2000); Saak et al. (2001); Bui et al. (2002); Assaad et al. (2003).

O desempenho dos superplastificantes depende de diversos fatores como a finura e a composição química do cimento, o modo de introdução na mistura, bem como a composição química do próprio aditivo. A adsorção dos aditivos se dá preferencialmente nas aluminatos do cimento, principalmente no  $C_3A$ , e ocorre em poucos segundos. Desta forma, quando são adicionados em conjunto com a água, a adsorção rápida faz com que poucas moléculas fiquem disponíveis na solução para promover a dispersão das fases silicatos e aumentar assim

a fluidez. Pode ocorrer ainda que o aditivo fique aprisionado na camada de gel formada com os primeiros hidratos ao redor dos grãos de cimento, impedindo sua ação. Isto mostra a importância de que o aditivo seja incorporado depois de decorrido um tempo da mistura do cimento com a água (RAMACHANDRAN et al., 1998).

A quantidade de sulfato alcalino presente na mistura também influencia no processo de adsorção do aditivo, reduzindo a adsorção nos aluminatos em função dos silicatos. Por outro lado, a existência de moléculas do aditivo livres na mistura pode levar a uma maior manutenção da fluidez, tendo em vista sua ação posterior. Verifica-se ainda que a adsorção é maior quando se aumenta a massa molecular do aditivo e a finura do cimento (NUNES, 2001).

A incorporação dos superplastificantes resulta na modificação de várias características da pasta de cimento, incluindo a porosidade e sua distribuição, a taxa de hidratação, a morfologia dos hidratos, o desenvolvimento da resistência, a fluidez e perda de fluidez com o tempo, o tempo de pega, a retração, segregação e exsudação, entre outras (RONCERO, 2000). Para que estes efeitos sejam satisfatórios, deve-se atentar para os requisitos de compatibilidade entre o cimento e os aditivos utilizados, já que, por se tratar da união de sistemas químicos complexos, podem surgir problemas que geralmente são manifestados por uma baixa fluidez inicial ou pela prematura perda de fluidez.

Com relação a reologia, os superplastificantes têm grande efeito na redução da tensão de escoamento, (BANFILL, 1994; SHEINN et al., 2003), embora Young (1982 apud RAMACHANDRAN et al., 1998) cite que pode ocorrer também uma redução da viscosidade plástica. Um estudo desenvolvido por Nawa e Eguchi (1992 apud RAMACHANDRAN et al., 1998) aponta que este efeito depende do tipo de cimento, pois, quando a área superficial é maior, tem-se um incremento na viscosidade plástica. A redução na tensão de escoamento é o principal fator responsável pela maior fluidez da mistura, porém, em alguns casos, ela não é mantida com o tempo.

A perda de fluidez dos concretos está relacionada a fatores físicos e químicos, sendo muito influenciada pelo processo de hidratação do cimento. Segundo Ahmad e Azhar (2003), sob condições normais, o volume de produtos de hidratação formados nos primeiros 30 minutos é pequeno, e a perda é desprezível. Isto pode ser alterado em função da temperatura ambiente, composição do cimento e aditivos empregados.

A perda de fluidez é maior em cimentos com um alto teor de  $C_3A$  (maior que 9%), como no caso dos cimentos tipos I<sup>4</sup> e III<sup>5</sup> da ASTM C 150, em temperaturas elevadas, e quando empregado um baixo teor de aditivo (RAMACHANDRAN et al., 1998; ACI 212.4R, 1996). Yamada et al. (1999) explicam que, sob temperaturas elevadas, o processo de hidratação do cimento é acelerado fazendo com que sua área específica aumente rapidamente, colaborando para a perda de fluidez.

Em geral, os superplastificantes promovem aumento no tempo de pega dos concretos. Uma explicação pode estar no consumo de íons  $Ca^{2+}$  por parte dos aditivos, que faz com que o processo de nucleação (formação de núcleos a partir dos íons  $Ca^{2+}$  permitindo a produção dos hidratos) durante a hidratação do cimento sofra um atraso (RONCERO et al., 2000 apud NUNES, 2001).

A exsudação e a segregação do concreto são reduzidas com o emprego de superplastificantes devido ao baixo teor de água adicionada. Nos concretos auto-adensáveis, tais fenômenos podem ocorrer se o teor de finos for insuficiente para manter a estabilidade da mistura.

Um ponto importante que deve ser definido no uso de superplastificantes relaciona-se à sua dosagem. Observa-se que existe um teor máximo de aditivo capaz de promover aumento da fluidez, acima do qual alguns dos efeitos indesejáveis citados acima podem ser observados. Este teor é denominado de ponto de saturação, e pode ser definido a partir de ensaios em pasta e argamassa. Os ensaios são realizados através do Cone de Marsh, que consiste em um funil pelo qual a mistura escoar, determinando-se o tempo de duração do escoamento, ou do mini-slump, que corresponde a um tronco de cone, no qual mede-se o diâmetro de espalhamento (Figura 10). O procedimento para a determinação do ponto de saturação consiste em variar o teor de aditivo, medindo-se o tempo de escoamento, ou o diâmetro de abertura, em cada ponto. A saturação ocorre quando o aumento no teor de aditivo não promove mais alterações nos resultados dos ensaios (AÏ TCIN et al., 1994).

<sup>4</sup> Equivalente ao CP I da NBR 5732

<sup>5</sup> Equivalente ao CP VARI da NBR 5732

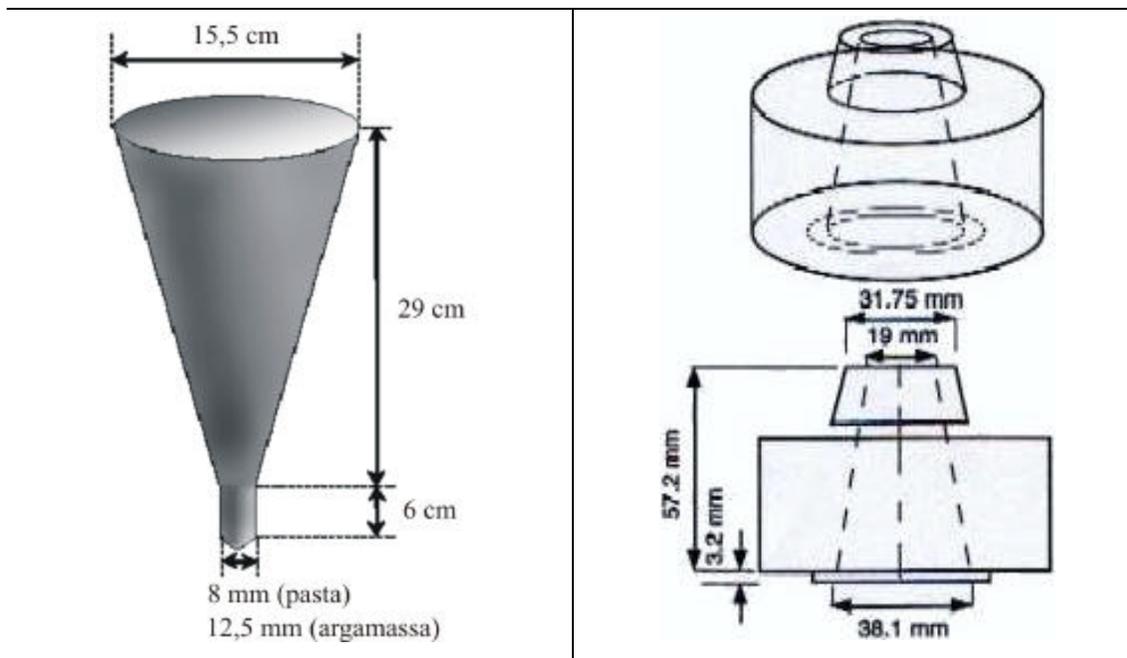


Figura 10 – Equipamentos para determinação do teor de saturação do aditivo superplastificante: (a) Cone de Marsh; (b) Mini-slump

### 3.1.5.2 Promotores de viscosidade

Um outro tipo de aditivo de importante aplicação no CAA é o promotor de viscosidade. Ele pode ser empregado quando o teor de finos for limitado, ajudando a promover a viscosidade necessária para garantir adequada resistência à segregação, além de contribuir para a homogeneidade da mistura. Sua ação se dá pela formação de uma rede que sustenta os agregados, evitando a segregação e a exsudação.

Os agentes promotores de viscosidade podem ser polímeros solúveis em água à base de celulose, acrílico ou glicol, biopolímeros, e agentes inorgânicos. Segundo Nunes (2001), estes agentes promovem a alteração da viscosidade do sistema por meio de dois mecanismos: adsorção na superfície das partículas finas ou dispersão em água. Quando são adsorvidos no cimento há uma redução na adsorção dos superplastificantes, fazendo com que o aumento da viscosidade seja conseguido às custas de uma redução na fluidez do concreto. Quando dispersos em água, as cadeias do polímero podem embeber a água livre, promovendo o aumento da viscosidade. Isto faz com que os agentes cujo modo de ação não se dá por adsorção, apresentem-se mais adequados para emprego em CAA (COPPOLA, 2001). Neste sentido, os melhores tipos de promotores de viscosidade são os biopolímeros, que consistem em produtos obtidos a partir de vegetais, algas ou formados na presença de microorganismos.

Dentre os principais biopolímeros utilizados no CAA, pode-se destacar o *welan gum*, que é um polissacarídeo.

A utilização dos aditivos promotores de viscosidade pode gerar no concreto um comportamento pseudoplástico, que corresponde à redução da viscosidade em função do aumento da taxa de cisalhamento aplicada. Este efeito pode facilitar a utilização do CAA, pois, como o lançamento do concreto nas formas ocorre sob elevadas taxas de cisalhamento, a viscosidade diminui facilitando esta operação. Por outro lado, após a aplicação, a viscosidade aumenta e garante ao concreto a capacidade de reter água e manter a sustentabilidade das partículas (KHAYAT et al., 1999).

Os promotores de viscosidade podem também ser uma importante ferramenta para reduzir os efeitos das variações de umidade e granulometria do agregado miúdo nas propriedades do concreto no estado fresco (EFNARC, 2002). Isto é possível devido a maior quantidade de água necessária para garantir adequada fluidez, que vai, por sua vez, governar as propriedades reológicas do concreto (COPPOLA, 2001). A Figura 11 mostra o efeito do *welan gum* na estabilização da fluidez do concreto em relação à variação da umidade (quando não há correção do teor de água em função deste parâmetro), conforme observado por Yurugi e Sakai (1998).

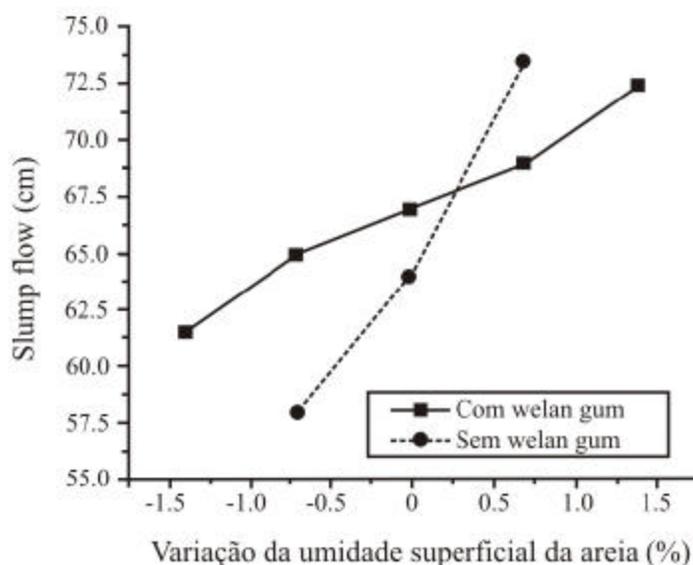


Figura 11 – Influência da umidade dos agregados na variação da fluidez do concreto (YURUGI; SAKAI, 1998)

Yurugi e Sakai (1998) indicam que, com uso de aditivo promotor de viscosidade, a influência do módulo de finura do agregado miúdo na deformabilidade do CAA também é menor.

Rols et al. (1999) desenvolveram um estudo com três novos tipos de promotores de viscosidade como alternativa para aplicação em concreto auto-nivelante em substituição ao welan gum, visto que este, apesar de apresentar um bom desempenho, confere um alto custo para o concreto. Os materiais avaliados são um polissacarídeo (amido), sílica precipitada e um sub-produto da indústria de amido. As propriedades estudadas foram fluidez, segregação, exsudação, resistência à compressão, retração e permeabilidade. Os resultados mostraram que a sílica precipitada e o amido são materiais viáveis em substituição ao welan gum especialmente no que diz respeito à exsudação e resistência à segregação.

Khayat et al. (1999) citam algumas vantagens advindas do emprego de aditivos promotores de viscosidade, que são:

- maior flexibilidade na escolha dos materiais e menor sensibilidade à mudanças;
- maior flexibilidade para a escolha do procedimento de lançamento;
- melhor microestrutura e homogeneidade;
- obtenção de um sistema de vazios estável.

Por outro lado, Petersson (1999) cita que o maior problema relacionado à utilização destes aditivos, está na alteração do desenvolvimento da resistência à compressão. Segundo o autor, com os tipos de aditivos superplastificantes encontrados, e com o emprego de adições, não há necessidade de se utilizar promotores de viscosidade em condições normais, apenas em casos especiais.

### **3.2 Dosagem**

A dosagem do concreto consiste em selecionar os componentes e determinar suas quantidades relativas, a fim de se obter, da maneira mais econômica, características mínimas de consistência, resistência e durabilidade (NEVILLE, 1997). Helene e Terzian (1993) citam ainda que a dosagem representa o proporcionamento adequado dos materiais constituintes para que sejam atendidas as exigências do projeto (características do concreto nos estados fresco e endurecido), as condições de exposição e operação das estruturas, o tipo de agregado disponível, as técnicas de execução, e o custo.

Os métodos de dosagem para concretos convencionais podem ser empíricos, no caso de obras de pequeno porte, ou experimentais, os quais podem ser baseados na granulometria dos agregados ou no teor de argamassa. Os métodos baseados no teor de argamassa são os mais empregados, destacando-se o método da ABCP e o do IPT/EPUSP. O primeiro define que a

quantidade de argamassa necessária na mistura é função da quantidade de vazios e do tipo de agregado miúdo empregado, devendo-se considerar que a argamassa irá preencher os vazios e lubrificar os grãos dos agregados graúdos (HELENE; TERZIAN, 1993).

O método do IPT/EPUSP baseia-se no ajuste de curvas de resistência em função dos requisitos de produção do concreto. O processo de dosagem, apresentado por Helene e Terzian (1993), parte da definição do teor ideal de argamassa em um traço intermediário para que se atinja uma determinada consistência, medida pelo ensaio de abatimento do concreto. O teor de argamassa é mantido e são produzidos traços auxiliares variando-se a quantidade de agregado, de forma a se obter uma mistura pobre e uma rica. Nestes concretos a água é ajustada para se obter a mesma trabalhabilidade, que permitirão a definição do diagrama de dosagem para os materiais empregados, através de leis de comportamento.

A relação água/cimento é fixada em função da resistência à compressão que se pretende obter. Esta relação foi proposta por Abrams em 1918, e, segundo Helene e Terzian (1993), é muito empregada até os dias atuais devido à sua praticidade. A Lei de Abrams é definida conforme a Equação 4 a seguir.

$$f_{cj} = \frac{k_1}{k_2^{a/c}} \quad (4)$$

Onde:

- $f_{cj}$  = resistência à compressão à idade  $j$  (MPa);
- $a/c$  = relação água/cimento, em massa;
- $k_1$  e  $k_2$  = constantes dependentes dos materiais.

Outras leis de comportamento foram definidas a fim de auxiliar a dosagem dos concretos convencionais, conhecidas como Lei de Lyse e Lei de Molinari, as quais estão representadas nas Equações 5 e 6, respectivamente.

$$m = k_3 + k_4 \cdot a/c \quad (5)$$

$$C = \frac{1000}{k_5 + k_6 \cdot m} \quad (6)$$

Sendo:

- $m$  = relação agregados/cimento, em massa;
- $C$  = consumo de cimento por  $m^3$  de concreto;
- $k_3$  a  $k_6$  = constantes dependentes dos materiais.

Segundo Okamura e Ouchi (1999), a dosagem do CAA não é feita em função da resistência à compressão porque as relações água/aglomerante são, em geral, suficientemente pequenas para garantir bons resultados de resistência à compressão, a menos que as adições empregadas não sejam reativas. Neste tipo de concreto, a dosagem tem como objetivo principal atender os requisitos básicos de deformabilidade, resistência à segregação e capacidade de passar por restrições, que são propriedades do estado fresco. Vale salientar que estas propriedades são mais afetadas por mudanças na qualidade e na proporção dos materiais aplicados do que as do estado endurecido.

É importante destacar que as propriedades do CAA no estado endurecido devem ser melhor investigadas para que também possam ser utilizadas na otimização da sua dosagem, possibilitando a produção de misturas mais econômicas. Emborg (1999) cita ainda alguns parâmetros que podem ser difíceis de serem detectados em testes de laboratório, mas que são importantes e precisam ser adicionados ao processo de dosagem do CAA, como a possibilidade de surgimento de poros na superfície das estruturas e de pressões adicionais nas formas durante o lançamento do concreto.

A Figura 12 apresenta uma comparação de volume dos materiais empregados em concreto convencional e CAA.



Figura 12 – Comparação de dosagem entre concreto convencional e CAA (OKAMURA; OUCHI, 2003a)

Os critérios de dosagem adotados para o CAA ainda não são completamente definidos, de forma que um ponto de partida são os traços desenvolvidos em trabalhos anteriores. A Tabela 2 apresenta as definições de diversos autores quanto às faixas de proporcionamento dos materiais.

Tabela 2. – Faixas de proporção dos materiais para CAA propostas na literatura

	cimento	água/finos	finos	água	agregado graúdo	agregado miúdo
Okamura (1997)	-	0,9 – 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 <sup>3</sup> )	-	< 340 (L/m <sup>3</sup> )	-
EFNARC (2002)	350 – 450 (kg)	0,80 – 1,10 (em volume)	160 – 240 (L/m <sup>3</sup> )	< 200 (L/m <sup>3</sup> )	28 – 35% do volume de concreto	-
Gomes (2002)	200 – 400 (kg)	0,25 – 0,40 (em massa)	200 – 250 (kg/m <sup>3</sup> )	150 – 180 (kg/m <sup>3</sup> )	30 – 35% do volume de concreto ou 750 – 920 (kg/m <sup>3</sup> )	40 – 50% do volume de argamassa ou 710 – 900 (kg/m <sup>3</sup> )

Gomes (2002) cita que o volume de pasta deve ser de 35 a 40% do volume de concreto, e a relação agregado graúdo/total de agregados deve variar de 0,44 a 0,64.

Em geral, o aditivo superplastificante é dosado para se obter a fluidez desejada, e pode ser determinado a partir de um estudo em pasta conforme será descrito posteriormente.

Durante o ajuste da dosagem em laboratório, a especificação da EFNARC (2002) cita algumas medidas que podem ser tomadas em caso de não adequação do concreto às exigências necessárias, que são:

- uso de diferentes tipos de finos;
- modificação na proporção dos agregados;
- uso de um agente promotor de viscosidade, caso não tenha sido usado;
- ajuste da dosagem dos aditivos superplastificante e promotor de viscosidade;
- uso de diferentes tipos de aditivos que possam ser mais compatíveis aos materiais empregados;
- alteração da dosagem de aditivo para modificar a quantidade de água adicionada e, com isso, a razão água finos.

Vários métodos de dosagem podem ser encontrados na literatura a fim de se obter uma composição mais otimizada do CAA. Os itens seguintes descrevem alguns deles.

### 3.2.1 Método de Okamura

Um dos métodos de dosagem mais difundidos é conhecido como Método de Okamura, proposto pelo Prof. Hajime Okamura, da Universidade de Tóquio. Segundo Gomes (2002), é provavelmente o primeiro método de dosagem racional desenvolvido para o CAA.

Sabe-se que há uma certa dificuldade em se manter um nível específico de auto-compactabilidade, em função da grande influência exercida pela qualidade dos materiais. Desta forma, o Método de Okamura parte de valores elevados para as características de auto-compactabilidade, medidas por ensaios que serão descritos posteriormente. O concreto é ajustado em função da sua aplicação e, com isso, são alargados os limites de controle da produção (NUNES, 2001). O método consta das seguintes etapas:

#### 1) Determinação do volume de ar

O método parte da limitação do volume de ar ( $V_a$ ) recomendando-se a adoção de valores entre 4 e 7%.

A recomendação da EFNARC (2002) indica que o teor usual é de 2%, devendo ser ajustado de acordo com a necessidade de resistência à ação do gelo-degelo.

#### 2) Determinação do volume de agregado graúdo

O volume de agregado graúdo ( $V_g$ ) deve ser fixado como o valor corresponde a um volume aparente de  $0,50 \text{ m}^3$ , no estado compactado, sendo definido pela Equação 7 (NUNES, 2001).

$$V_g = 0,5 \cdot \frac{\delta}{d} \cdot (1 - V_a) \quad (7)$$

Onde  $\delta$  corresponde à massa unitária e  $d$  à massa específica do agregado graúdo.

#### 3) Determinação do volume de agregado miúdo

O volume de agregado miúdo ( $V_s$ ) é fixado em 40% do volume de argamassa, e pode ser determinado pela Equação 8 (NUNES, 2001).

$$V_s = \frac{0,4 \cdot (1 - V_a - V_g)}{1 - ksf} \quad (8)$$

Sendo  $ksf$  equivalente à parcela de areia com dimensão menor que  $0,075 \text{ mm}$ , que contribui no teor de finos.

#### 4) Determinação da razão água/finos e do teor de superplastificante

A razão água/finos e o teor de aditivo superplastificante empregados na dosagem do CAA são determinados a partir de ensaios em argamassa. Estes valores devem ser ajustados para

atender as características de auto-compactabilidade exigidas. Para isto, o método preconiza a realização de ensaios que dêem alguma indicação das propriedades reológicas da argamassa, que são, o ensaio de espalhamento (*Slump flow*) e o ensaio de fluidez (Funil-V).

O ensaio de espalhamento da argamassa é realizado em um molde de forma tronco cônica, cujas dimensões são apresentadas no item 4.1.1, medindo-se o diâmetro de abertura da mistura, a partir do qual determina-se a área de espalhamento relativa ( $G_m$ ), conforme Equação 9.

$$G_m = \left( \frac{d}{d_0} \right)^2 - 1,0 \quad (9)$$

Onde  $d$  é o diâmetro medido após o espalhamento da argamassa e  $d_0$  é o diâmetro inicial, que corresponde à base do molde, cujo diâmetro é de 100 mm.

No ensaio de fluidez determina-se o tempo ( $t$ ) necessário para o escoamento da argamassa, calculando-se, posteriormente, o tempo de escoamento relativo ( $R_m$ ), obtido pela Equação 10.

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

Conforme Takada et al. (1998 apud NUNES, 2001), uma argamassa adequada para se chegar a um CAA deve ter  $G_m = 5,0$  e  $R_m = 1,0$ .

Inicialmente as argamassas devem ser ensaiadas para a determinação do espalhamento e da fluidez, variando-se o teor de aditivo superplastificante para que se obtenha o ponto em que  $G_m/R_m$  é igual a 5,0. Com o teor de aditivo definido, são realizados novos ensaios em argamassas, para determinação da relação água/finos que deve variar até que se obtenha o valor ideal que atenda a relação apresentada na Equação 11.

$$\frac{R_m}{G_m^{0,4}} = 0,525 \quad (11)$$

A dosagem de superplastificante deve ainda ser corrigida a partir de ensaios no concreto, tendo em vista possuir uma ação diferente em relação à argamassa. Para isto, devem ser realizados os ensaios de espalhamento e Funil-V.

Nunes (2001) apresenta ainda uma metodologia para ajuste inicial da relação água/finos a partir de ensaios de espalhamento das pastas, determinando-se o índice de espalhamento relativo  $G_p$ . Os resultados devem ser ajustados em uma reta, conforme exemplo apresentado na Figura 13. Com isto, determina-se o ponto de interseção da reta encontrada com o eixo referente à relação água/finos, definindo o ponto  $\beta_p$  que indica o teor de água retido pelos

finos. Esta etapa deve ser realizada antes do estudo em argamassa, de forma que se tenha um ponto de partida da relação água/finos para auxiliar no ajuste do aditivo e do teor de água final.

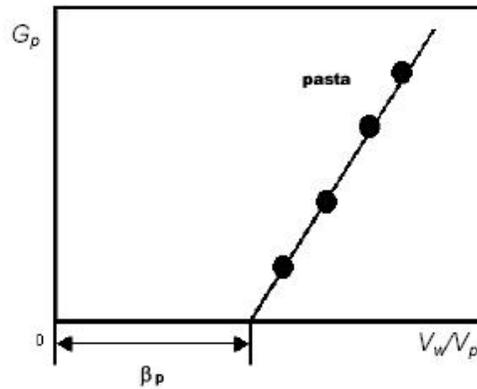


Figura 13 – Exemplo de curva para determinação da relação água/finos ( $V_w/V_p$ ) em função do espalhamento das pastas (NUNES, 2001)

##### 5) Avaliação da auto-compactabilidade do concreto

Após o ajuste da dosagem do superplastificante realizam-se ensaios para determinação da capacidade de enchimento por meio da Caixa-U.

A Figura 14 ilustra o procedimento geral deste método.

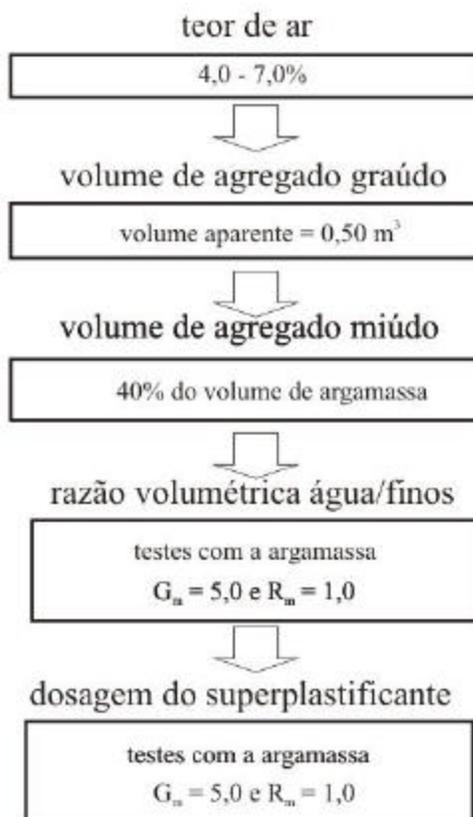


Figura 14 – Fluxograma do Método de dosagem de Okamura (NUNES, 2001)

O método de Okamura leva a um grande volume de pasta, pois os parâmetros são fixados sem que sejam determinados de forma racionalizada.

### 3.2.2 Outros exemplos de métodos de dosagem do CAA

#### Método do CBI

Nunes (2001) cita o método proposto por Petersson e Billberg do CBI (Swedish Cement and Concrete Research Institute) que, em contrapartida ao Método de Okamura, baseia-se na determinação da 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. É determinado, então, o volume total de agregado graúdo em relação ao total de agregados e o volume máximo de agregado possível, para que não ocorra o bloqueio. Esta avaliação se dá por meio

de ensaios com a Caixa-U, que será apresentado posteriormente, podendo-se, com isto, determinar a quantidade mínima de pasta necessária.

Finalmente, as quantidades de finos e aditivos são ajustadas na pasta, em função da resistência à compressão desejada e das propriedades reológicas (tensão de escoamento e viscosidade). Em seguida, são avaliadas as propriedades de auto-compactabilidade do concreto. Na Figura 15, tem-se uma representação esquemática deste método.

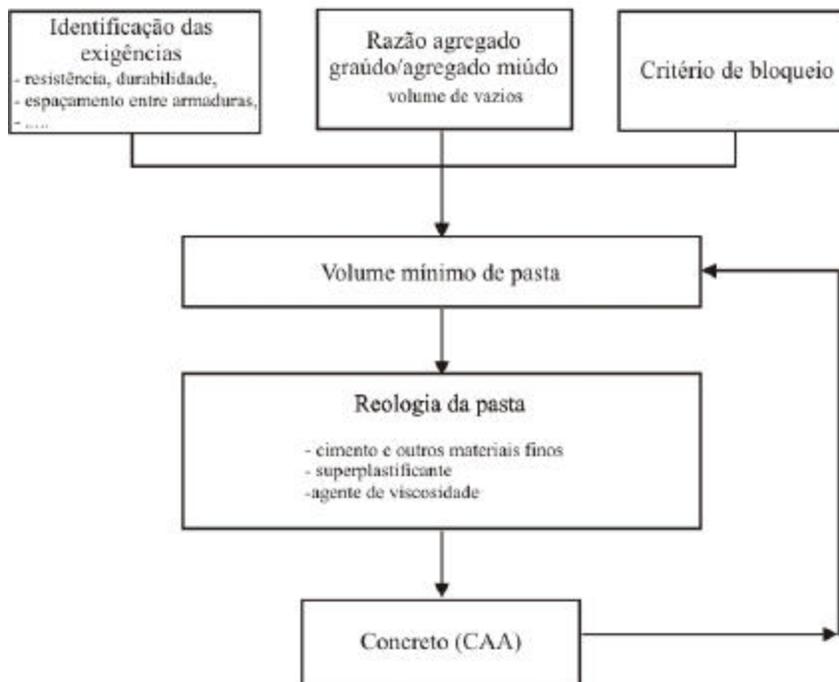


Figura 15 – Método de dosagem proposto pelo CBI (NUNES, 2001)

#### Método baseado na demanda de água dos materiais constituintes

Este método foi desenvolvido por Marquardt et al. (2002), da Universidade de Rostock, na Alemanha, e parte do pressuposto de que o principal fator que controla as propriedades do concreto, tanto no estado fresco como no estado endurecido, é a definição precisa do teor de água. Para isto, o método parte da determinação da demanda de água dos materiais constituintes do concreto (cimento, agregados e adições).

O procedimento de dosagem consiste, primeiramente, na determinação do volume de agregados, a partir do ajuste da sua composição granulométrica para que se tenha o menor volume de vazios, em  $1 \text{ m}^3$  de concreto. Com isto, determina-se o volume de pasta através de algumas expressões matemáticas, considerando-se que ela é necessária para preencher os

vazios entre os agregados e envolver os sólidos, para permitir a fluidez do concreto. Em seguida, define-se o teor de cimento em função das propriedades do concreto no estado endurecido, e o teor ótimo de aditivo superplastificante.

Com estes parâmetros definidos, determinam-se a massa específica e a absorção de água dos sólidos através de argamassas padrão, medindo-se a potência decorrente da força aplicada sobre o misturador, à medida que se aumenta a quantidade de água da mistura. Por fim, aplica-se um algoritmo para calcular o volume de adição, o teor final de aditivo e o volume de água.

#### Método para CAA de Alta Resistência

Este método foi desenvolvido por Gomes (2002) e apresenta um procedimento de dosagem de CAA com altas resistências. O método assume que o concreto é um material composto de duas fases, a pasta e os agregados e é definido em três etapas básicas: composição da pasta, definição do esqueleto granular e ajuste do volume de pasta.

A determinação da composição da pasta envolve a definição do tipo e teor de superplastificante e teor de adição (fíler), por meio de ensaios de Cone de Marsh e mini-slump. O esqueleto granular define a composição de agregados e é ajustado em função da relação agregado miúdo/agregado graúdo, combinando-se estes materiais para se chegar ao menor teor de vazios, que vai gerar também um volume mínimo de pasta. A etapa final da dosagem ocorre no concreto e consiste na definição do teor mínimo de pasta para que sejam atingidos os requisitos de auto-compactabilidade. O teor de pasta é variado medindo-se a auto-compactabilidade do concreto por meio dos ensaios definidos para este fim.

Na Figura 16 tem-se o fluxograma do método apresentado.



Figura 16 – Fluxograma do método de dosagem para CAA de alta resistência (GOMES, 2002)

#### Método baseado na Teoria do controle da segregação

Avaliando a dificuldade de se garantir adequada resistência à segregação de misturas fluidas, Saak et al. (2001) propuseram um método de dosagem chamado de Teoria do controle da segregação. O método propõe que a reologia da pasta de cimento governa a resistência à segregação e a fluidez do concreto fresco para uma dada distribuição granulométrica e um volume dos agregados. A partir do balanço das forças no estado estacionário e durante o transporte da mistura, que atuam sobre uma partícula de agregado envolvida pela pasta de cimento, conforme ilustrado na Figura 17, determina-se que os parâmetros governantes são a densidade, a tensão de escoamento e a viscosidade da pasta. Estes parâmetros são medidos e verifica-se se há conformidade com a Equação 12.

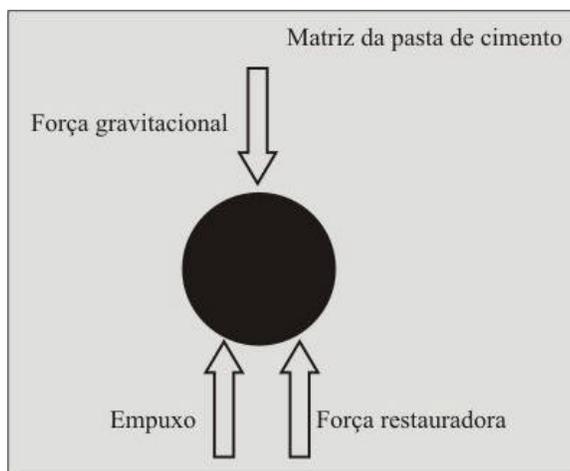


Figura 17 – Balanço de forças atuando sobre uma partícula de agregado imersa numa pasta de cimento  
(SAAK et al., 2001)

$$\frac{\tau_y}{\Delta\rho} \geq \frac{4}{3} \cdot g \cdot r \quad (12)$$

Onde:  $\tau_y$  = tensão de escoamento da pasta;  $\Delta\rho$  = diferença entre as densidades do agregado e da matriz;  $g$  = constante gravitacional;  $r$  = raio da partícula.

Finalmente os autores definem uma região crítica de tensão de escoamento e de viscosidade onde a segregação é minimizada, denominada de região de auto-compactabilidade. São produzidas misturas de concreto para diversas proporções de pasta-agregado miúdo-agregado graúdo, e realiza-se o ensaio da Caixa-U, apresentado posteriormente. Relacionam-se os resultados obtidos com o comportamento da pasta correspondente.

Partindo do trabalho anterior e considerando que as partículas possuem uma forma esférica, Bui et al. (2002) estudaram a relação entre a reologia da pasta, a distância média entre os agregados e seus diâmetros médios. O método parte do pressuposto que o volume de pasta deve ser suficiente para preencher os vazios entre as partículas e criar uma camada que as envolva. Misturas de concreto são produzidas e suas propriedades são avaliadas selecionando as que apresentaram conformidade com os critérios exigidos. Em seguida, realiza-se o ensaio de espalhamento do concreto e a determinação das propriedades reológicas em pasta. É feita então uma comparação das propriedades medidas em pasta com o desempenho do concreto, para cada valor de distância interpartículas e diâmetro dos agregados, determinando-se regiões de misturas consideradas auto-adensáveis. A Figura 18 ilustra esta região satisfatória para misturas empregando um único tipo de agregado.

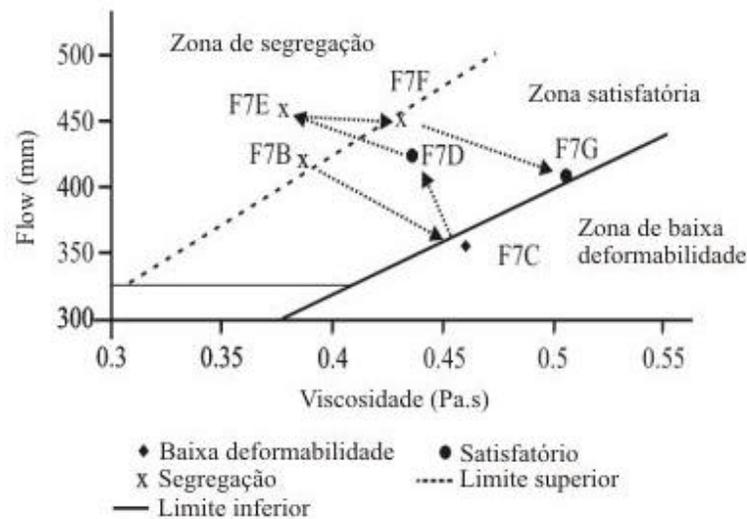


Figura 18 – Região de auto-compactabilidade em termos de espalhamento (*Slump flow*) e viscosidade da pasta de cimento (BUI et al., 2002)

Na Figura, os índices representando as misturas indicam as seguintes características:

- de F7B para F7C: aumento no teor de cinza;
- de F7C para F7D: aumento no teor de aditivo superplastificante;
- de F7D para F7E: nova adição de superplastificante;
- de F7E para F7F: incorporação de aditivo promotor de viscosidade;
- de F7F para F7G: aumento no teor de aditivo promotor de viscosidade.

Com isto, demonstra-se a influência da utilização de cinzas volantes, aditivo superplastificante e aditivo promotor de viscosidade nas propriedades reológicas da pasta.

### 3.2.3 Limitações dos métodos de dosagem do CAA

Os métodos de dosagem do CAA, definidos na literatura, apresentam algumas limitações quanto à otimização do proporcionamento dos materiais, o que demonstra a necessidade de novas investigações neste sentido.

Em geral, o CAA é dosado para atender os requisitos exigidos no estado fresco, que confirmam sua auto-compactabilidade, que são a capacidade de preenchimento, capacidade de passar por restrições (resistência ao bloqueio) e resistência à segregação. Estes parâmetros são bastante sensíveis às variações sofridas pelos materiais constituintes e alterações no processo de produção, o que exige que haja um rigoroso controle na sua determinação. Além disso, são

fundamentais para a garantia da qualidade na aplicação do material, pois poderão definir as condições de mistura, transporte e lançamento do CAA, o que é de grande importância para propiciar seu maior emprego prático.

Todas estas implicações justificam a atenção especial que tem sido dada ao atendimento das exigências do estado fresco na dosagem do CAA. Por outro lado, as propriedades do concreto no estado endurecido também são de extrema importância, pois irão influenciar a qualidade da estrutura final, bem como aspectos referentes à sua durabilidade. Aplicando-se os métodos de dosagem até então definidos, estas propriedades têm sido obtidas satisfatoriamente, em consequência do atendimento das características de auto-compactabilidade. No entanto, vê-se a necessidade de investigar a possibilidade de otimização das misturas utilizando também critérios como a resistência à compressão, por exemplo.

Analisando-se os trabalhos publicados, observa-se que os concretos obtidos resultam em valores elevados de resistência à compressão, em consequência da baixa relação água/aglomerantes definida (NUNES, 2001). Aspectos como fissuração e retração são reduzidos em função do baixo consumo de cimento propiciado pela utilização de grande quantidade de adições, as quais também vão contribuir para densificar a microestrutura do concreto, aumentando sua durabilidade. Desta forma, não há uma grande preocupação em se englobar estas propriedades no processo de dosagem do CAA.

Percebe-se, porém, que muitas vezes o bom desempenho encontrado para o CAA no estado endurecido, resulta de teores superestimados dos materiais, especialmente do cimento e aditivo, para que os requisitos de auto-compactabilidade sejam atendidos, abrindo-se mão da racionalização do processo, e da possibilidade de se encontrar misturas mais econômicas. Isto é evidenciado, por exemplo, em concretos com altos volumes de pasta, adotado para garantir a elevada fluidez, ou com uso de adições em teores abaixo do possível, que gera um consumo de cimento maior do que o necessário, e, conseqüentemente, maior custo.

Tendo em vista os aspectos acima citados, no presente trabalho propõe-se o estudo de alguns parâmetros de dosagem para a definição de um método de proporcionamento de CAA, tendo como ponto de partida a resistência à compressão. Com isto, não há necessidade de que o concreto seja sempre de alta resistência, podendo-se difundir a sua produção com resistências normais (20 a 40 MPa), fazendo-o mais próximo da realidade das construções usuais. Isto é possibilitado pelo uso do filler calcário como adição, o qual vai auxiliar no atendimento dos requisitos do estado fresco, especialmente no adequado preenchimento dos vazios entre os agregados, aumento da viscosidade, e, conseqüentemente da resistência à segregação, sem

causar influência significativa na resistência à compressão. O método define, então, que a resistência à compressão é um fator que vai contribuir de modo muito importante para a racionalização da dosagem do CAA.

Desta forma, pode-se ressaltar a importância de estudar diferentes formas de dosagem do CAA, buscando-se cada vez mais, aliar a qualidade requerida para o material nos estados fresco e endurecido, com economia e viabilidade de produção.

### **3.3 Cuidados básicos na produção e aplicação**

Conforme apresentado anteriormente, o CAA é bastante sensível às alterações dos materiais e processos de produção. Isto faz com que sejam necessários cuidados especiais na sua produção, de forma a se obter as propriedades desejadas.

Por se tratar de uma nova tecnologia, o uso do CAA requer adaptação do canteiro ou da central dosadora, bem como treinamento das pessoas envolvidas na sua produção e aplicação. Ensaio diferentes daqueles aplicados ao concreto convencional, devem ser realizados para melhor caracterizar o CAA em função das suas características particulares.

O primeiro cuidado que se deve tomar refere-se à escolha dos materiais que serão empregados. Deve-se ter um controle rigoroso, especialmente em relação à variação da umidade e da granulometria dos agregados. Tviksta (2000) cita que a umidade deve ser determinada com uma precisão de 0,5% para permitir a adequada correção do volume de água.

Outro ponto a ser observado diz respeito ao procedimento de mistura do CAA, envolvendo também o tempo necessário e o tipo de misturador utilizado. Segundo Jaramillo et al. (2003), o CAA demanda mais tempo de mistura que o concreto convencional, para permitir que o aditivo desenvolva plenamente seu efeito. Emborg (2000) cita que este tempo deve ser de 1,5 a 3 vezes maior do que o empregado para concreto convencional. O autor indica também que misturas desenvolvidas em laboratório devem ser adaptadas antes de se iniciar a produção em larga escala, sendo avaliadas por meio dos diversos métodos de ensaio, que serão apresentados em seguida. A seqüência de mistura, por sua vez, altera as propriedades finais do CAA, tanto do estado fresco como do estado endurecido, e deve ser otimizada para cada tipo de misturador. No caso do concreto produzido em central, antes de se iniciar a dosagem dos materiais, deve-se certificar que o interior do caminhão está úmido, mas sem água livre.

Em relação ao transporte do CAA produzido em central, Tviksta (2000) indica que o balão deve permanecer sempre em rotação a baixa velocidade, a fim de se evitar a segregação. Na chegada do material ao local de aplicação, antes do lançamento, deve-se aumentar a velocidade de mistura para 10 a 20 rpm (podendo variar com o tipo de misturador), durante um tempo mínimo de 3 minutos. Quando a distância de transporte for muito grande a ponto de alterar a fluidez do concreto, deve-se optar por adicionar o aditivo na obra. Em caso de necessidade de ajuste da fluidez, Emborg (2000) apresenta a possibilidade de se promover a correção através de superplastificante, não sendo recomendada a adição de água para este fim. Ao contrário, se o concreto está excessivamente fluido, pode-se continuar a mistura por mais um período de tempo, até que seja atingida a viscosidade necessária.

Durante o lançamento do CAA, deve-se atentar para a pressão nas formas, que é aumentada em função da alta fluidez e taxa de preenchimento. Para isto, devem ser empregados novos tipos de forma, planejadas para suportar pressões hidrostáticas. Por apresentarem maior qualidade, estas formas vão conseqüentemente ser mais duráveis, compensando o investimento necessário para sua substituição (SKARENDAHL, 2003).

A concretagem com CAA só deve ser iniciada após a realização de ensaios que avaliem o atendimento aos requisitos de auto-compactabilidade. Tviksta (2000) aponta a necessidade de se observar a altura da bomba à região de lançamento, que deve ser de 3 m, a fim de propiciar que o concreto se espalhe até uma distância máxima de 10 m a partir do ponto de aplicação. Emborg (2000) cita que a pressão na bomba durante o lançamento do CAA, pode ser maior do que a observada no concreto convencional, devido à grande quantidade de finos e, em alguns casos, à alta viscosidade da mistura. Segundo este autor, se a mistura apresentar tendência à segregação, podem ocorrer problemas durante a aplicação, do contrário, a operação deverá acontecer sem dificuldades.

No caso da aplicação do CAA em grandes áreas, Tviksta (2000) indica a possibilidade de se concretar previamente algumas regiões, que podem servir para direcionar o fluxo do concreto, para que seu a distância de espalhamento seja limitada em até 6 a 8m. É importante também que a concretagem se dê de forma contínua, pois paradas durante o lançamento deste concreto podem levar ao aumento excessivo da coesão, com perda de fluidez.

Juvas (2004) cita que alguns cuidados também devem ser tomados nas indústrias de pré-moldados que empregam CAA. Primeiramente, é importante prestar atenção ao controle de qualidade dos materiais. Em relação à produção, deve-se evitar a agitação do concreto durante seu transporte, para que não ocorra exsudação e segregação, além de não serem permitidos

atrasos na aplicação, impedindo assim que o concreto perca suas características iniciais de fluidez. Os moldes devem apresentar superfícies limpas e lisas, devendo-se aplicar produtos desmoldantes, conforme deve ser feito no concreto convencional. Para evitar a incorporação de ar, o CAA não deve ser aplicado com excessiva rapidez e de ser necessário controlar a altura de queda. O lançamento em peças de elevada altura deve ser feito por meio de funil. Por fim, a cura precisa ser realizada adequadamente.

## **4 ENSAIOS EM CONCRETO AUTO-ADENSÁVEL**

O CAA é caracterizado, principalmente, por meio de suas propriedades no estado fresco, de forma que os métodos aplicados na caracterização dos concretos convencionais não são adequados para este material. Por isso, alguns métodos de ensaio têm sido propostos para avaliar as propriedades do CAA. Porém, alguns problemas a serem resolvidos estão relacionados à reprodutibilidade dos resultados na sua aplicação, à variação dos resultados em função do operador, diminuindo sua confiabilidade, e à falta de normalização (GIBBS, 2004).

É importante destacar, em relação a estes ensaios, que pode ocorrer variação significativa dos resultados em função da forma de mistura e da temperatura (BRAMESHUBER, 2004; GIBBS, 2004). Neste sentido, Brameshuber (2004) sugere a necessidade de estudos que especifiquem várias faixas de flutuação das propriedades do CAA no estado fresco, de acordo com a variação da temperatura.

Com o intuito de se chegar a um melhor entendimento e escolha dos tipos de ensaios para avaliar o desempenho do CAA, os itens seguintes apresentam os principais métodos agrupados de acordo com as propriedades medidas, que são: capacidade de preenchimento, resistência ao bloqueio, resistência à segregação e propriedades reológicas.

### **4.1 Capacidade de preenchimento e resistência ao bloqueio**

Encontra-se na literatura diversos ensaios para avaliação das propriedades básicas do CAA (COPPOLA, 2001; EFNARC, 2002; GOMES, 2002; NUNES, 2001), os quais serão apresentados nos itens a seguir. Em muitos casos, estes ensaios devem ser realizados em conjunto para que se tenha uma análise completa do comportamento do concreto.

#### **4.1.1 Ensaio de espalhamento**

O ensaio de espalhamento, ou *Slump flow*, determina a capacidade de preenchimento, ou deformabilidade, do CAA, sob ação do seu peso próprio. Consiste na medição do diâmetro de abertura da mistura após seu espalhamento, e é realizado no cone de Abrams, empregado no ensaio de abatimento. O procedimento de ensaio consiste na medição do diâmetro em duas direções, perpendiculares entre si, fazendo-se a média entre eles para a determinação do resultado do ensaio.

Segundo Sugamata et al. (2003), o *Slump flow* dá um indicativo da distância entre as partículas, quando a mistura é deformada sob condições não-restringidas, e cresce com o aumento do teor de água e aditivo superplastificante. O resultado deste ensaio está

diretamente relacionado com a propriedade reológica de tensão de escoamento, conforme observado por diversos autores (ESPING, 2003; SHEINN et al., 2003; SHOYA et al., 1999).

Através do espalhamento, pode-se medir também o tempo gasto para que o concreto escoe até o diâmetro de 500 mm ( $T_{500}$ ), relacionando-o com a velocidade de fluidez e com a viscosidade. Segundo Níekson e Wallevik (2003), erros possíveis de medição decorrem da dificuldade da determinação do tempo especialmente quando a abertura do concreto não se dá de modo uniforme. Por outro lado, os pesquisadores afirmam que  $T_{500}$  apresenta boa relação com a viscosidade plástica sob condições de fluidez livre de restrições.

Pode-se, ainda, fazer uma avaliação visual da mistura, para verificar a ocorrência de segregação ou exsudação. No caso de um estudo em argamassas, o espalhamento pode ser medido utilizando-se um molde com dimensões reduzidas. A Figura 19 ilustra os equipamentos para ensaio em concreto e argamassa.

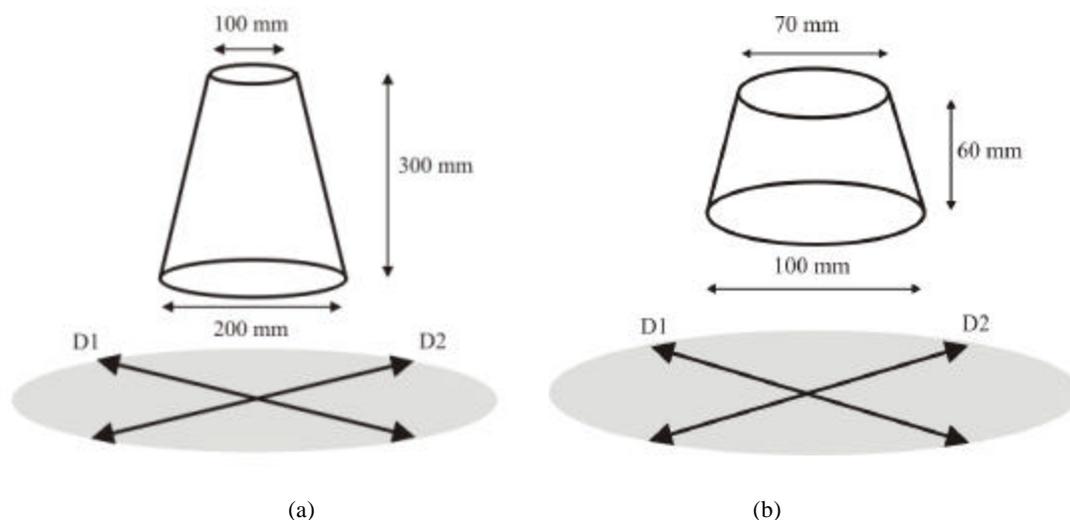


Figura 19 – Ensaio de espalhamento ou *Slump flow*: (a) concreto; (b) argamassa (NUNES, 2001)

O ensaio do espalhamento é um dos mais utilizados para a caracterização do CAA, especialmente devido à facilidade de execução. Porém, deve ser acompanhado de outros ensaios para descrever com precisão a qualidade do concreto. Hodgson (2003) cita algumas informações complementares que podem ser obtidas, de forma a auxiliar a avaliação, que são:

- análise da distribuição do agregado graúdo, verificando se há concentração de partículas no centro do espalhamento;
- análise da segregação e exsudação, verificando a presença de uma fina camada de pasta ou água de exsudação ao redor da região de espalhamento;

- análise da forma assumida pelo concreto durante o espalhamento, verificando se a abertura é regular.

#### 4.1.2 Funil -V

Este ensaio é realizado por meio do preenchimento de um funil de seções retangulares com o CAA, medindo-se o tempo gasto para o escoamento completo da mistura. Expressa uma avaliação da capacidade do concreto de passar por seções estreitas, sendo também um indicativo da viscosidade da mistura. Pode também dar indícios sobre a frequência de contato entre as partículas, quando submetidas à deformação imposta por uma restrição (SUGAMATA et al., 2003). Quanto maior a relação água cimento, menor é esta frequência de contato entre as partículas, e menor é o tempo de escoamento no funil. O aumento no teor de superplastificante não gera grande influência no tempo de fluidez medido por este ensaio.

Este ensaio também está relacionado com a resistência à segregação, que pode ser avaliada através da repetição do ensaio 5 min após a primeira determinação, verificando se houve um acréscimo de tempo, em relação à medida inicial, maior que 3 segundos (EFNARC, 2002). Pode ser realizado em argamassas com um funil de dimensões reduzidas quando comparado ao funil utilizado em concreto (Figura 20).

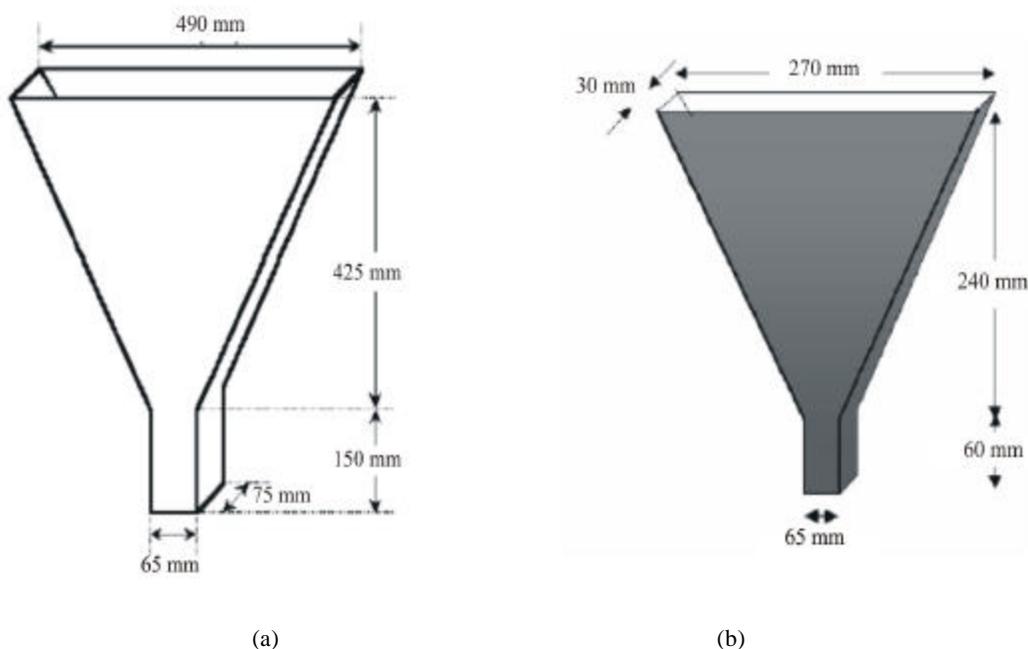


Figura 20 – Funil-V: (a) concreto; (a) argamassa (NUNES, 2001)

Bramshuber (2004) aponta que o Funil-V é mais representativo da viscosidade do que o  $T_{500}$ , especialmente quando os valores resultantes são baixos.

Na Figura 21 apresentam-se classes de consistência do CAA e suas aplicações, em função do diâmetro de espalhamento e do tempo de escoamento no Funil-V.

Funil-V (s)			
9-25	Rampas		Est. Altas Esbeltas
5-9		Paredes	
3-5	Pisos		
	5	6	7
	470-570	540-660	630-800
	Classes de consistência <i>Slump flow</i> (mm)		

Figura 21 – Faixas de aplicação do CAA em relação às classes de consistência definidas pelo *Slump flow* e Funil-V (WALRAVEN, 2003)

#### 4.1.3 Caixa-L

Neste ensaio, determina-se a capacidade do concreto de passar por restrições, simulando-se as armaduras, bem como sua deformabilidade, resistência ao bloqueio e resistência à segregação. A determinação é feita a partir do preenchimento da parte vertical da caixa em formato L, permitindo-se passagem do material para a parte horizontal após este escoar pelas barras verticais existentes (Figura 22). O resultado é obtido a partir da razão entre as alturas nas partes horizontal ( $H_2$ ) e vertical ( $H_1$ ) da caixa. Uma outra possibilidade é medir o tempo decorrido para que o concreto atinja as distâncias de 20 e 40 cm ao longo do eixo horizontal, definindo-se como adequados tempos menores que 1 e 2 segundos, respectivamente (GOMES, 2002).

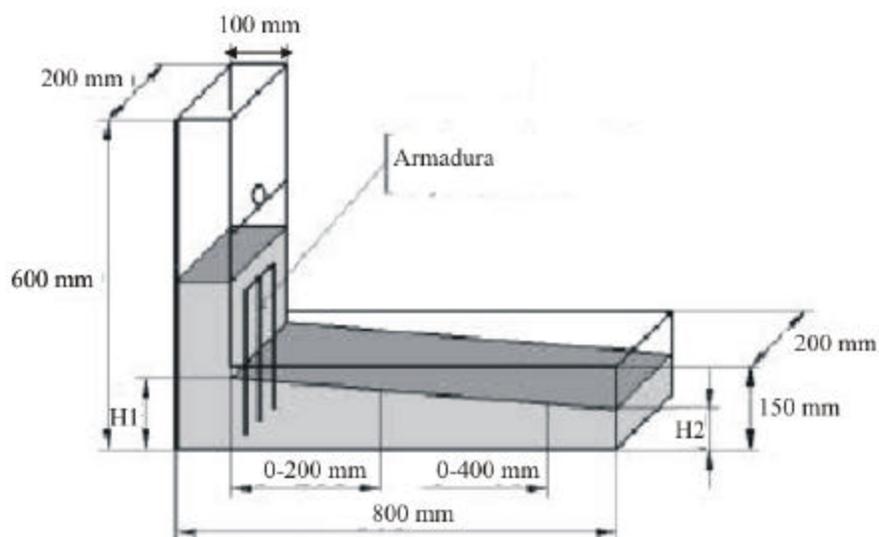


Figura 22 – Ensaio da Caixa-L (EFNARC, 2002)

Num estudo desenvolvido por Petersson (1999), verificou-se que o número ideal de barras que devem ser empregadas neste ensaio é de 3, podendo-se variar o diâmetro e, conseqüentemente, o espaçamento entre elas. Com isto, tem-se a avaliação da capacidade do concreto de passar pelas armaduras, o que é um bom indicativo do volume mínimo de pasta, em função da granulometria do agregado graúdo, para que seja evitado o bloqueio.

#### 4.1.4 Caixa-U

O ensaio da Caixa-U é bastante completo pois mede a auto-compactabilidade do concreto, além de dar indicativos sobre a viscosidade. Consiste em uma caixa com dois compartimentos isolados entre si por uma comporta, onde um deles é preenchido pelo concreto e então é permitida sua passagem para o outro lado. Desta forma, o concreto atravessa obstáculos similares a armaduras. Avalia-se, então, a altura atingida pelo material na segunda parte da caixa, conforme mostrado na Figura 23. Coppola (2001) sugere ainda a medição do tempo decorrente até a estabilização da mistura, definindo como adequado quando se dá entre 5 e 10 segundos.

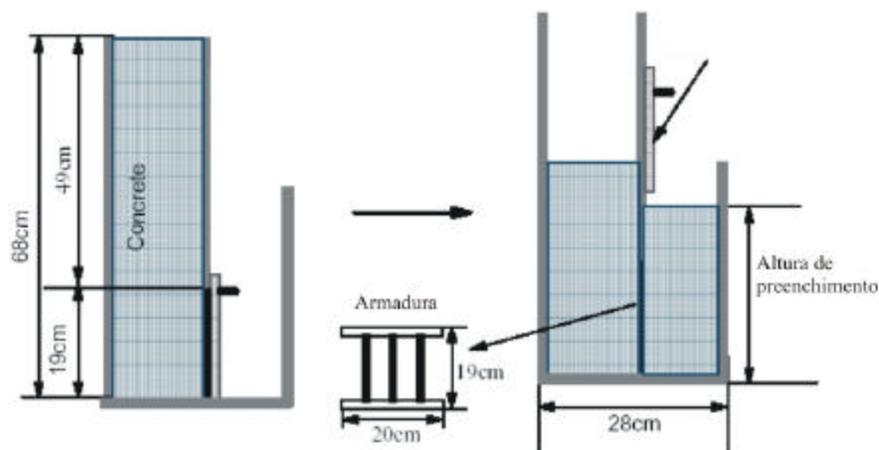


Figura 23 – Ensaio da Caixa-U (GOMES, 2002)

Um estudo elaborado por Shindoh e Matsuoka (2003) indica que, por meio deste ensaio, observa-se o aumento da auto-compactabilidade com a incorporação de aditivo superplastificante, atingindo um valor máximo. A partir deste ponto há uma redução da auto-compactabilidade evidenciada pela ocorrência de segregação no concreto.

#### 4.1.5 Orimet

O Orimet consiste em um tubo vertical com um formato cônico na parte inferior, conforme Figura 24, e é empregado para se medir a facilidade de fluidez do concreto, estando também relacionado com a viscosidade.

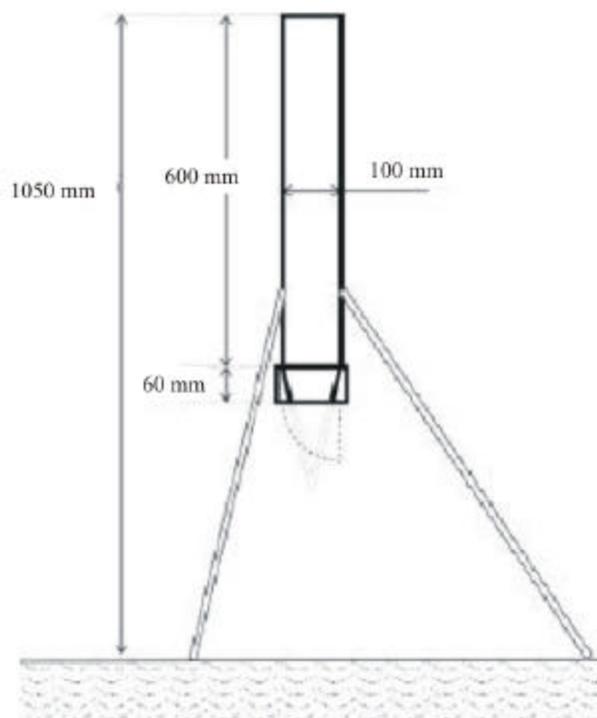


Figura 24 – Ensaio do Orimet (EFNARC, 2002)

Uma vantagem deste ensaio é a facilidade de execução e a possibilidade de simular o movimento aproximado do concreto durante o bombeamento. O procedimento de ensaio se dá pelo preenchimento do tubo com o CAA, medindo-se o tempo gasto para seu escoamento completo.

Segundo Nielsson e Wallevik (2003), uma vantagem deste ensaio em relação à reologia, está no fluxo uniforme promovido por ele, ou seja, o concreto se movimenta da mesma maneira durante todo o ensaio, ao contrário que se observa durante o ensaio do Funil-V.

#### 4.1.6 Anel japonês

Este ensaio, também conhecido como J-ring, pode ser utilizado em conjunto com o espalhamento ou o Orimet, acrescentando a estes a avaliação da resistência ao bloqueio. O equipamento consiste de um anel de seção transversal circular de 300 mm de diâmetro, com barras verticais espaçadas de acordo com o desempenho requerido para o concreto, como pode ser visto na Figura 25. Após o escoamento do concreto através do cone de Abrams (*Slump flow*) ou do Orimet, avalia-se a diferença de altura entre a porção da mistura que

permaneceu no interior do anel, e a parcela que se espalhou para o seu exterior. Pode-se também fazer uma análise visual da ocorrência de bloqueio ou segregação.

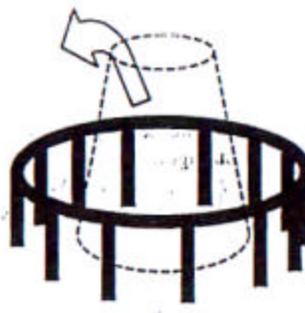


Figura 25 – Anel japonês (EFNARC, 2002)

#### 4.1.7 Requisitos de ensaio para CAA

A Tabela 3 apresenta os valores requeridos para que o concreto seja classificado como auto-adensável de acordo com cada um dos ensaios descritos acima, segundo a literatura do tema.

Tabela 3. – Faixas de resultados para a avaliação do CAA em termos de deformabilidade e resistência ao bloqueio

Ensaio	Nunes (2001)	Coppola (2001)	EFNARC (2002)	Gomes (2002)
Slump flow (mm)	600 - 700	600	650 - 800	600 - 700
$t_{50}$ - Slump flow (s)		5 - 12	3 - 7	4 - 10
Funil-V (s)	10	2 - 12	6 - 12	10 - 15
Caixa-U (mm)	300	300		300
Caixa-L ( $H_2/H_1$ )	0,8	0,8	0,8 - 1,0	0,8
Orimet (s)			0 - 5	< 3
J-ring (mm)			0 - 10	

#### 4.2 Resistência à segregação

Além dos ensaios realizados no Funil-V e na Caixa-L, encontram-se na literatura alguns outros métodos para avaliação da resistência à segregação. Segundo Gibbs (2004), este parâmetro consiste na propriedade com maior dificuldade de medição. Os parágrafos seguintes apresentam os métodos propostos, bem como os princípios de avaliação.

Khayat (1999) apresenta um teste simples para avaliação da estabilidade do concreto e sua habilidade em assegurar a suspensão das partículas sólidas. O equipamento consiste em um

tubo de PVC de 800 mm de altura e 200 mm de diâmetro, conforme apresentado na Figura 26. O tubo é preenchido com o CAA até a altura de 700 mm apoiando-se sobre ele um extensômetro ou LVDT, através do qual mede-se a sedimentação da superfície do concreto decorrente da acomodação das partículas, cujo resultado está relacionado com a segregação e exsudação.

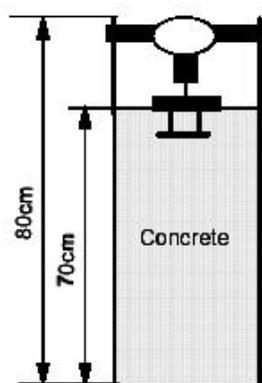


Figura 26 – Medida da sedimentação da superfície em amostra de concreto (KHAYAT, 1999)

Bui et al. (2002) propõem um método de ensaio para a determinação da resistência à segregação do CAA quando lançado nas direções horizontal e vertical. Para avaliar a segregação horizontal emprega-se o ensaio da Caixa-L em conjunto com dois cilindros de 70 mm de altura e 80 mm de diâmetro, preenchendo-se um dos cilindros com o material que fica em frente à armadura, no compartimento horizontal, e o outro com o material da parte final da caixa. Lava-se o concreto e pesam-se as partículas dos agregados de diâmetro maior que 9,5 mm, considerando-se boa resistência à segregação quando a diferença de massa for menor que 10% .

No caso da resistência à segregação na direção vertical, emprega-se um molde de 420 mm de altura e seção transversal quadrada com 100 mm de lado. O concreto é colocado em um cone e após 1 minuto permite-se seu escoamento para o preenchimento do molde. Após o início de pega, os corpos-de-prova são cortados ao meio na direção vertical e um dos lados é cortado em seis pedaços na direção horizontal. A avaliação é feita pesando-se as partículas de agregado graúdo com diâmetro maior que 9,5 mm e calculando-se a variação de sua massa (Rv) por meio da Equação 13. O valor obtido deve ser menor que 10%.

$$Rv = \left[ \sum \left\{ \left( \frac{V_{gi} - V}{V} \cdot 100 \right)^2 / 6 \right\} \right]^{1/2} \quad (13)$$

Nesta equação,  $V_{gi}$  é a massa em cada porção, e  $V$  é a massa média total do agregado graúdo com dimensão maior que 9,5 mm.

Além dos métodos de ensaio apresentados, uma forma simples de avaliar a resistência à segregação do concreto pode ser por meio de uma análise visual de corpos-de-prova serrados, ou após seu rompimento para avaliação da resistência à compressão, verificando se há uniformidade na distribuição das partículas dos agregados.

### 4.3 Propriedades reológicas

A determinação dos parâmetros referentes ao modelo reológico de Bingham, normalmente adotado para o concreto, ocorre medindo-se a tensão sofrida pela mistura em decorrência da variação da taxa de cisalhamento. Os ensaios são realizados em equipamentos denominados reômetros, sendo que dentre os mais utilizados para a análise de pastas de cimento, argamassas ou concretos pode-se destacar os de cilindros coaxiais.

No reômetro de cilindros coaxiais, o concreto é colocado na região existente entre dois cilindros concêntricos, e na construção mais comum, mede-se o torque aplicado ao cilindro externo a partir da rotação do cilindro interno. Um inconveniente deste ensaio em concreto é a formação de uma camada lubrificante em torno das paredes dos cilindros, devido a ocorrência do efeito parede. Isto promove o escorregamento do material, fazendo com que o resultado obtido não represente seu comportamento real, ao longo de todo o seu volume. Uma forma de minimizar este efeito é conferir uma textura rugosa à superfície dos cilindros (SAAK et al., 2001b). Este tipo de equipamento fornece a relação entre a taxa de cisalhamento e a tensão de cisalhamento, definindo-se através de modelos matemáticos, a tensão de escoamento ( $\tau_0$ ) e a viscosidade ( $\eta$ ) da mistura. No caso do concreto o modelo mais empregado é o de Bingham.

A determinação da tensão de escoamento e da viscosidade deve ocorrer após alguns ciclos de variação da taxa de cisalhamento, conforme ilustrado na Figura 27 para um ensaio realizado em pasta. Isto permite a quebra total da estrutura, promovendo a formação de um histórico de cisalhamento, o que vai garantir maior precisão nos resultados do ensaio (BANFILL, 2003; SHEINN et al., 2003).

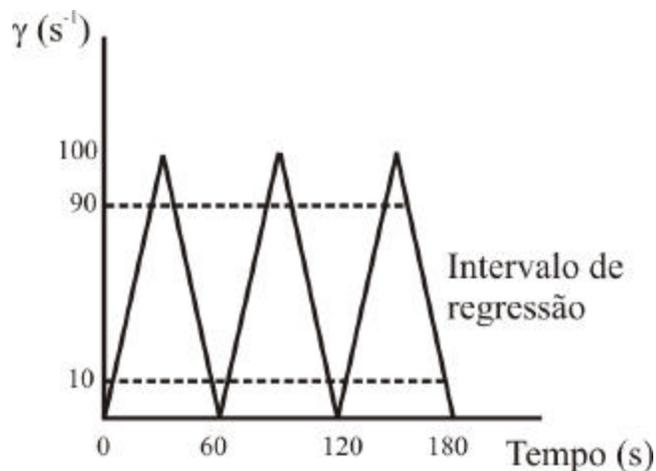


Figura 27 – Histórico de cisalhamento em pasta (SHEINN et al., 2003)

Os reômetros são equipamentos relativamente complexos e de custo elevado, que devem ter dimensões suficientemente grandes para se considerar o concreto como um fluido homogêneo (NUNES, 2001), o que faz com que sua utilização seja restrita a alguns laboratórios. Além disso, no caso do CAA, os valores obtidos para os parâmetros reológicos podem variar com os diferentes tipos de reômetros. Isto pode estar relacionado a alterações promovidas pelo próprio ensaio nas propriedades do material (GOMES, 2002; NUNES, 2001). Quanto mais fluida e estável for a mistura, mais confiáveis são os resultados obtidos (WALLEVIK, 2003). Por outro lado, Emborg (1999) cita que os ensaios de reologia são mais precisos na determinação das propriedades do concreto do que os métodos de ensaio empíricos, especialmente devido à sua menor dependência da experiência do operador.

Estes ensaios também podem ser desenvolvidos em pasta e argamassa, utilizando-se equipamentos de dimensões menores, também chamados de viscosímetros.

#### 4.4 Avaliação do concreto em campo

Além dos métodos citados para a avaliação do CAA no estado fresco, Ouchi et al. (1999 apud OKAMURA; OUCHI, 2003a) propuseram um equipamento especial para avaliação do concreto no canteiro. O método consiste em avaliar se o material é capaz de fluir através de um aparato instalado entre o caminhão betoneira e a bomba. Se for observado bloqueio na região das armaduras, causando impedimento ao fluxo, o concreto é considerado inadequado em termos de auto-compactabilidade, devendo-se fazer um ajuste da dosagem. A Figura 28, apresenta o detalhe do equipamento.

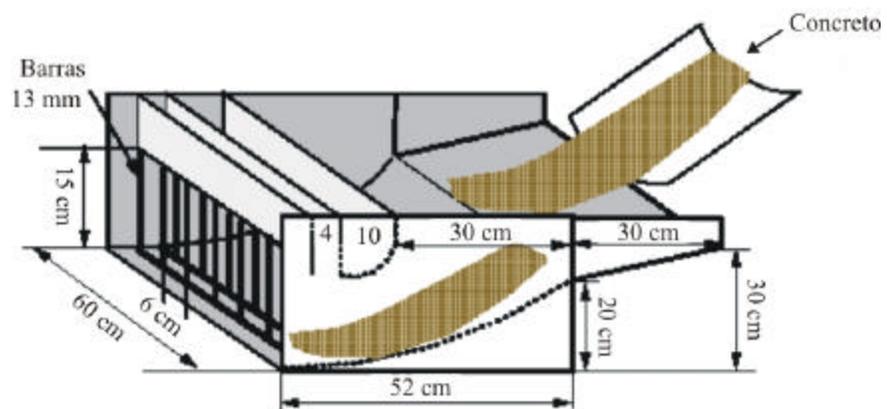


Figura 28 – Detalhe do equipamento empregado para avaliação do CA A no campo (GOMES, 2002)

## 5 MATERIAIS E MÉTODO

Neste trabalho, realizou-se um estudo visando a otimização da dosagem do CAA com resistência à compressão normal (20 a 40 MPa), avaliando-se a influência do proporcionamento dos materiais, nas propriedades do concreto nos estados fresco e endurecido. Esta otimização objetiva a definição de um método de dosagem racional, permitindo a produção de concretos mais econômicos.

Este Capítulo traz a descrição dos materiais empregados e dos procedimentos experimentais adotados na execução do trabalho. A fase experimental foi desenvolvida, em sua grande parte, no Laboratório de Materiais de Construção Civil – LMCC, do Departamento de Engenharia Civil – ECV, sendo os ensaios de reologia realizados no Laboratório de Materiais – LabMat, do Departamento de Engenharia Mecânica – EMC, ambos na Universidade Federal de Santa Catarina – UFSC.

O procedimento experimental adotado neste trabalho consta das seguintes etapas:

### 1) Seleção e caracterização dos materiais

O primeiro passo desenvolvido para a realização deste trabalho foi a seleção e caracterização dos materiais empregados. A escolha do material se deu em função da sua utilização na região de estudo, e da sua adequação para a obtenção das propriedades requeridas para o CAA.

### 1) Definição de faixas granulométricas ideais

Nesta etapa foram definidas faixas granulométricas ideais dos agregados em função do que se tem apresentado na literatura para o CAA. Este estudo teve como objetivo determinar a composição ideal dos agregados a partir da sua granulometria, sendo definida a proporção entre areia fina e areia média para o agregado miúdo, e entre brita 0 e brita 1 para o agregado graúdo.

### 2) Determinação da relação água/cimento

Foram determinadas as relações água/cimento em função da resistência à compressão desejada (20, 30 e 40 MPa), a partir do emprego da expressão de Abrams definida para concreto convencional com o tipo de cimento utilizado.

### 3) Estudos em pasta

Partiu-se para o estudo da fase de pasta, buscando-se investigar a influência do teor de fíler em função da variação da relação água/cimento e a possibilidade de definição do teor de aditivo através de diferentes procedimentos de ensaio. Determinou-se o teor de fíler a partir da

sua incorporação em substituição volumétrica ao cimento, até que se observasse a segregação da pasta, sem o emprego de superplastificante. O volume encontrado foi variado em  $\pm 5\%$ , obtendo-se 3 diferentes teores para cada relação água/cimento. Em seguida, determinou-se o teor de saturação do aditivo por meio dos ensaios do Cone de Marsh e viscosímetro, verificando-se a relação entre os resultados, para que se pudesse definir um critério de determinação do teor de aditivo na pasta. Com os resultados do viscosímetro, investigou-se também a existência de alguma relação entre as propriedades reológicas das pastas e os ensaios que definem a auto-compactabilidade das argamassas e concretos.

#### 4) Estudos em argamassa

Nesta fase do estudo, foram produzidas argamassas com diferentes teores de agregado miúdo, avaliando-se sua influência na obtenção das propriedades de auto-compactabilidade. Com isto, foi possível se determinar o volume ideal de agregado miúdo em relação ao volume total de argamassa, para cada relação água/cimento empregando-se o teor médio de fíler determinado na pasta. Foram adotados três teores de agregado e definiu-se o teor ideal em função dos ensaios de espalhamento e Funil-V. Para cada volume de agregado, variou-se a quantidade de aditivo, de forma a se identificar as argamassas que atendessem os requisitos exigidos nestes ensaios. Empregando-se o teor de agregado miúdo definido, foram produzidas as argamassas com os demais teores de fíler, variando-se novamente a quantidade de aditivo e avaliando-se os mesmos critérios de ensaio citados. Esta avaliação permitiu a obtenção de argamassas ideais para cada conjunto água/cimento - fíler que apresentassem resultados dos ensaios dentro dos limites especificados, bem como os teores de aditivo para que estas misturas fossem atingidas. As argamassas que atenderam os requisitos desejados, foram ensaiadas em relação à resistência à compressão aos 7 e 28 dias, massa específica e teor de vazios.

#### 5) Produção do concreto

Para a produção do concreto, estudou-se inicialmente a influência da dimensão do agregado graúdo e do seu volume em relação ao volume total de concreto, na obtenção de concretos estáveis e com adequada resistência ao bloqueio. A verificação foi feita por meio dos ensaios de espalhamento, Funil-V e Caixa-L. Em seguida, ajustou-se o teor de aditivo superplastificante para que fossem atendidos os requisitos de auto-compactabilidade definidos pelos ensaios citados, sendo ainda avaliados em relação à segregação, exsudação, resistência à compressão, módulo de elasticidade, massa específica e teor de vazios.

#### 6) Otimização da dosagem do CAA

A partir das etapas apresentadas para o desenvolvimento do trabalho, estudaram-se os aspectos relacionados à otimização da dosagem do CAA, avaliando-se os parâmetros obtidos nas fases de pasta, argamassa e concreto.

Na Tabela 4, tem-se um resumo do procedimento experimental adotado neste trabalho.

Tabela 4. – Resumo do procedimento experimental adotado no desenvolvimento do trabalho

Fase	Etapa	Procedimento	Objetivo
	Seleção e caracterização dos materiais	Ensaio definidos nas normas	Obter as principais características dos materiais
	Definição da granulometria ideal dos agregados	Análise das curvas granulométricas dos agregados empregados na literatura para CAA	Obter a composição ideal entre os agregados para promover maior qualidade dos concretos
	Determinação da relação água/cimento	Em função da resistência à compressão	Encontrar a relação água/cimento para se atender a resistência à compressão especificada para o concreto aos 28 dias
Pasta	Ajuste do fíler	Análise visual para determinação da ocorrência de segregação	- Ajustar o teor de fíler em função da relação água/cimento para promover a retenção da água;
	Ajuste do aditivo	Ensaio com o Cone de Marsh	- Avaliar a relação entre os resultados do Cone de Marsh e do viscosímetro;
		Ensaio com viscosímetro	- Avaliar a relação entre as propriedades reológicas da pasta e a auto-compactabilidade das argamassas e dos concretos.
Argamassa	Ajuste do agregado miúdo	Ensaio de espalhamento e Funil-V	- Determinar o teor ideal de agregado miúdo para cada relação água/cimento;
	Ajuste do aditivo		- Ajustar o teor de aditivo para se atingir os requisitos de auto-compactabilidade;
	Massa específica e Teor de vazios Propriedades mecânicas	Relação com a massa específica teórica Resistência à compressão	- Avaliar o teor de vazios das argamassas; - Acompanhar o desenvolvimento da resistência à compressão e comparar com os resultados do concreto.
Concreto	Ajuste do agregado graúdo	Ensaio de espalhamento, Funil-V e Caixa -L	- Determinar o teor de agregado graúdo para garantir a estabilidade do concreto;
	Ajuste do aditivo		- Ajustar o teor de aditivo para obtenção das propriedades adequadas para o CAA;
	Perda de fluidez		- Avaliar a perda de fluidez ocorrida nos concretos;
	Massa específica e Teor de vazios	Relação com a massa específica teórica	- Avaliar o teor de vazios, comparando com os valores definidos na literatura;
	Segregação	Caixa -L e seção transversal dos CP's	- Avaliar a ocorrência de segregação nas direções vertical e horizontal;
	Exsudação Propriedades mecânicas	Medida água superficial em recipiente padrão Resistência à compressão Módulo de elasticidade	- Avaliar a ocorrência de exsudação; - Avaliar as propriedades mecânicas do concreto, verificando o atendimento aos valores definidos inicialmente
	Otimização da dosagem	Acompanhamento dos parâmetros definidos em todas as fases do estudo	Obter um método otimizado de dosagem para CAA com resistência à compressão normal

## 5.1 Seleção e caracterização dos materiais

Foram utilizados materiais produzidos e distribuídos na Grande Florianópolis, e que são comumente empregados nas construções locais, com exceção do filer calcário, utilizado como adição, que é proveniente de Curitiba – PR. Com isto, pode-se melhor representar o impacto da produção do CAA na região. Estes materiais foram caracterizados conforme ensaios descritos em norma.

### 5.1.1 Cimento

Foi empregado o cimento CP VARI RS, da marca Votoran, que se classifica como um cimento de alta resistência inicial. Na Tabela 5 estão apresentadas as principais características deste cimento, o qual se destaca pela maior finura em relação aos demais, que pode contribuir para o aumento da fluidez dos concretos, pela presença de pozolanas em sua composição, e pelos altos níveis de resistência à compressão, especialmente nas primeiras idades. Com o ensaio de granulometria a *laser*<sup>6</sup>, determinou-se a distribuição granulométrica deste material, cuja curva encontra-se na Figura 29. Este ensaio foi realizado no laboratório da Grace do Brasil, localizado em Sorocaba – SP.

---

<sup>6</sup> O equipamento utilizado foi um granulômetro a *laser* da marca Malvern E verl. 2b, # serial 7386

Tabela 5. – Características do cimento CP V ARI RS (Dados fornecidos pelo fabricante)

Composição Química (%)	
SiO <sub>2</sub>	23,38
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	7,63
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	2,95
CaO	51,00
MgO	5,43
SO <sub>3</sub>	3,47
Na <sub>2</sub> O	0,20
K <sub>2</sub> O	1,06
CO <sub>2</sub>	2,16
Perda ao fogo	3,15
Resíduo insolúvel	13,81
Propriedades Físicas	
Blaine (cm <sup>2</sup> /g)	5118
Massa específica (g/cm <sup>3</sup> )	2,97
Início de pega (min)	252
Fim de pega (min)	321
Resistência à Compressão (MPa)	
1 dia	24,83
3 dias	34,72
7 dias	39,63
28 dias	46,91

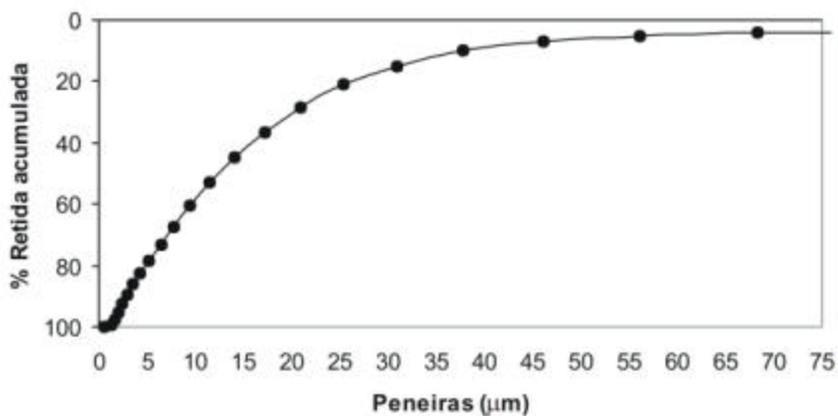


Figura 29 – Curva granulométrica do cimento empregado

### 5.1.2 Fíler calcário

Dada a necessidade de se ter uma grande quantidade de finos para promover maior viscosidade ao CAA, a adição empregada neste trabalho foi fíler calcário dolomítico, o qual é encontrado com facilidade na região de estudo. A escolha deste material se deu devido à busca de uma adição que não exercesse forte interferência na resistência à compressão do concreto, tendo em vista que esta propriedade serviu de ponto de partida para a determinação dos parâmetros de dosagem.

Foram utilizados dois tipos de fíler, um da marca GULIN, identificado neste trabalho como F1, e outro da marca CALFIPAR, identificado como F2. O fíler F1 caracteriza-se por apresentar 60% de suas partículas com diâmetro inferior a 0,075 mm e dimensão máxima de 1,2 mm, enquanto que no fíler F2 estes valores correspondem a 95% e 0,3 mm, respectivamente. Neste trabalho, adotou-se a peneira de 0,075 mm para a classificação dos finos, seguindo a indicação da NBR NM 46 (2003) para determinação da fração fina dos agregados. Estes materiais, de características granulométricas distintas, foram empregados com o intuito de se verificar a influência desta variação na produção do CAA. Determinou-se a distribuição granulométrica dos dois tipos de fíler através de granulometria a *laser*, cujo resultado está apresentado na Figura 30.

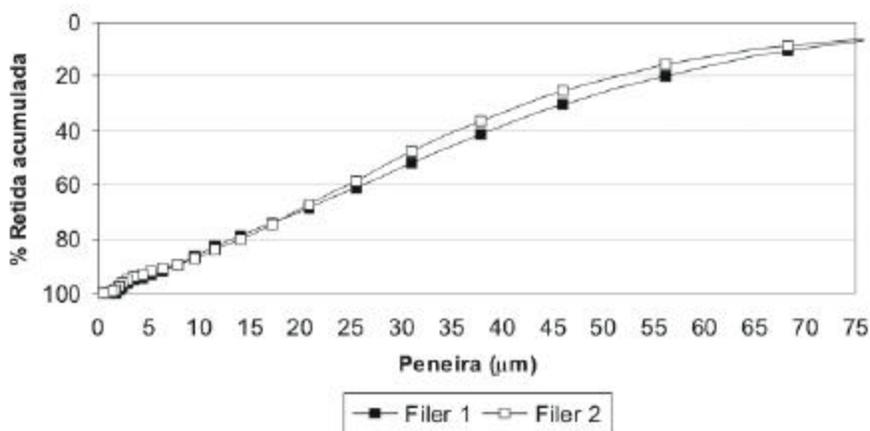


Figura 30 – Curvas granulométricas dos dois tipos de fíler calcário empregados

No caso do fíler F1, a figura apresenta apenas a parcela passante na peneira de 0,075 mm. A fração do material com dimensão superior a 0,075 mm, que corresponde a aproximadamente 40%, foi considerada como parte integrante do agregado miúdo, o qual teve seu volume corrigido em função desta incorporação.

Foi determinada a massa específica destes materiais pelo método do picnômetro (NBRNM 52, 2002), no qual utilizou-se uma bomba de vácuo para promover a expulsão do ar entre as partículas. A área específica foi determinada método de Blaine, seguindo o procedimento descrito na NBRNM 76 (1998). Calculou-se também o fator de inclinação, cujo valor encontrado para os dois tipos de fíler foi maior do que 2, o que caracteriza um material de granulometria adequada para ser utilizado em substituição ao cimento, conforme descrito no item 3.1.2. Na Tabela 6, tem-se as principais características destes materiais.

Tabela 6. – Principais características do fíler

Marca	% partículas com dim. < 0,075 mm	Dimensão máxima (mm)	Massa específica (kg/dm <sup>3</sup> )	Área específica (cm <sup>2</sup> /g)	Fator de inclinação (FI)
GULIN (F1)	60	1,2	2,87	163,44 *	2,202 *
CALFIPAR (F2)	95	0,075	2,85	145,68	2,202

\* Considerando-se apenas a parcela passante na peneira de 0,075 mm

Na Tabela 7 apresenta-se a composição química do fíler F2, devendo-se chamar atenção para o teor de óxido de magnésio, que é superior a 20%, e, desta forma, pode causar problemas em relação à durabilidade do concreto quando exposto à intempéries. Contudo, este trabalho não apresenta uma avaliação da durabilidade dos concretos, tendo em vista que não foi utilizado em estruturas correntes, sendo necessária esta avaliação para futuras aplicações.

Tabela 7. – Composição química do fíler F2

Composição química (%)	
Perda ou Rubro	43,16
Insolúvel em HCl	4,32
Oxido de Ferro (Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> )	0,05
Oxido de Cálcio (CaO)	31,39
Oxido de Magnésio (MgO)	20,81
Óxido de Alumínio (Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> )	-
Metais pesados	-

### 5.1.3 Agregados

Como agregado miúdo, utilizou-se a combinação entre uma areia média de rio e uma areia fina de duna, para que se obtivesse um teor de finos capaz de promover melhorias em termos de fluidez e deformabilidade. No caso do agregado graúdo, estudou-se o emprego de uma composição entre brita 0 e brita 1, ambos de origem granítica.

A caracterização destes materiais consistiu na determinação da distribuição granulométrica (NBRNM 248, 2001), material pulverulento (NBRNM 46, 2003), massa específica (NBR 9776, 1987; NBR 9937, 1987), massa unitária no estado solto (NBR 7251, 1982) e no estado compactado (NBR 7810, 1983) e absorção de água (NBRNM 30, 2001; NBRNM 53, 2002). Na Tabela 8 encontram-se os resultados da caracterização dos agregados, e na Figura 31 estão ilustradas as curvas granulométricas.

Tabela 8. – Características dos agregados

		Areia Fina	Areia Média	Brita 1	Brita 0	
Granulometria (% ret. acumulada)	Abertura das peneiras (mm)	38	0	0	0	
		25	0	0	0	
		19,5	0	0	2,67	0
		12,5	0	0	52,45	0
		9,5	0	0	84,45	1,10
		6,3	0	0,08	99,54	47,26
		4,8	0	0,32	100,00	82,06
		2,4	0	4,33	100,00	99,18
		1,2	0	21,65	100,00	99,72
		0,6	0,02	52,66	100,00	99,72
		0,3	7,77	77,39	100,00	99,72
		0,15	96,04	89,70	100,00	99,72
		0,075	99,93	96,00	100,00	99,72
		Fundo	100,00	100,00	100,00	100,00
Diâmetro máximo característico (mm)		0,6	2,4	19,5	9,5	
Diâmetro mínimo característico (mm)		0,15	<0,15	6,3	2,4	
Módulo de Finura		1,04	2,46	-	-	
Massa específica (kg/dm <sup>3</sup> )		2,65	2,62	2,68	2,68	
Massa unitária no estado solto (kg/dm <sup>3</sup> )		1,52	1,38	1,52	1,39	
Massa unitária compactada (kg/dm <sup>3</sup> )		1,65	1,57	1,57	1,55	
Absorção de água (%)		0,15	2,10	0,60	1,03	

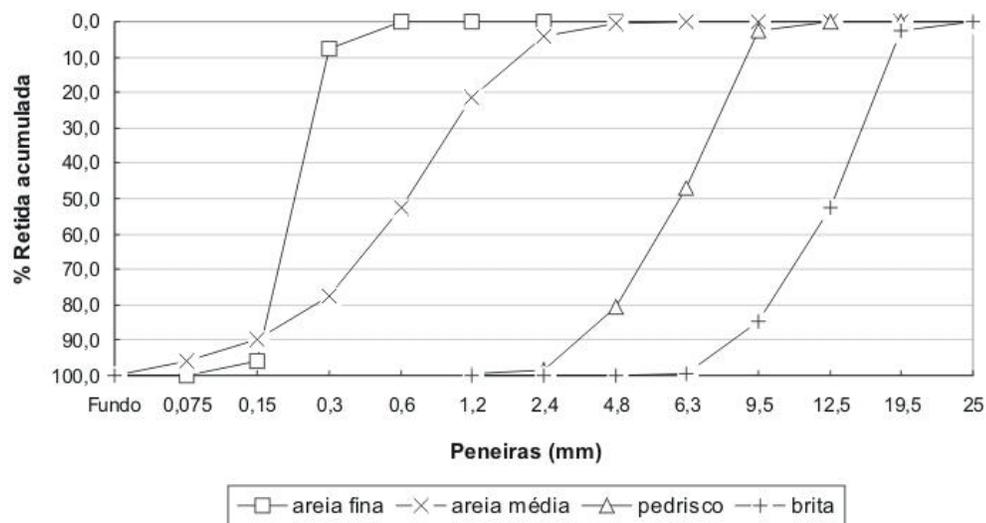


Figura 31 – Curvas granulométricas dos agregados

Na determinação da absorção de água das areias, os valores apresentados na tabela correspondem à diferença entre a umidade definida por secagem em estufa, que consiste na umidade total, e a umidade medida pelo Frasco de Chapman (NBR 9775, 1987), que indica a umidade superficial. Este procedimento foi adotado porque se julgou ser mais preciso do que o método descrito na NBRNM 30 (2001), que apresenta uma caracterização visual da absorção. Os valores adotados foram ligeiramente menores que os obtidos seguindo a determinação da norma.

#### 5.1.4 Aditivo

Como superplastificante foi empregado o aditivo à base de policarboxilato, Glenium 51, fabricado pela empresa Degussa Construction Chemicals. A Tabela 9 traz as principais características deste aditivo, conforme especificação do fabricante. Os teores de aditivo utilizados neste trabalho estão apresentados em função do teor de sólidos, que se encontra na tabela, sendo feita a correção da água adicionada à mistura. As porcentagens de aditivo apresentadas são relacionadas à massa de cimento. Não foram empregados aditivos promotores de viscosidade.

Tabela 9. – Características do aditivo Glenium 51

Propriedade	Característica do aditivo
Principal componente químico	Policarboxilato
Densidade (kg/L)	1,07 a 1,11 g/cm <sup>3</sup>
Estado físico	Líquido
Teor de sólidos médio (%)	30,0
Dosagem recomendada pelo fabricante* (% m.c.)	0,5 – 0,8

\* Porcentagem especificada em função da massa total do aditivo na forma líquida

## 5.2 Definição dos parâmetros básicos para composição das misturas

### 5.2.1 Faixas granulométricas ideais

Observa-se que a granulometria dos sólidos (cimento, adições, agregados miúdo e graúdo) influencia na obtenção das propriedades do CAA, de forma que é muito importante a definição de faixas granulométricas aceitáveis para os materiais empregados. Isto permite a obtenção de combinações que promovam maior preenchimento dos vazios, com as partículas menores ocupando os espaços entre as maiores, e mantenham o distanciamento adequado entre as partículas, levando à otimização do volume de pasta. Porém, nos métodos de dosagem propostos para o CAA, não se observam critérios para determinação da granulometria dos sólidos.

No caso dos agregados, determinou-se a composição ideal entre as areias média e fina, para o agregado miúdo, e brita 0 e brita 1, para o agregado graúdo. Isto se deu a partir da adequação de suas curvas granulométricas a uma faixa obtida através das curvas dos agregados usualmente empregados na literatura (BUI et al., 2002; GHEZAL; KHAYAT, 2002; GOMES, 2002; NUNES, 2001; RAVINDRARAJAH et al., 2003), para a produção de CAA. Dessa forma, observou-se que as composições adequadas são de 20% de areia fina e 80% de areia média, como agregado miúdo, e 30% de brita 0 e 70% de brita 1, como agregado graúdo. As Figuras 32 e 33 ilustram as faixas granulométricas encontradas para os agregados miúdo e graúdo, respectivamente, mostrando também as curvas obtidas para as composições.

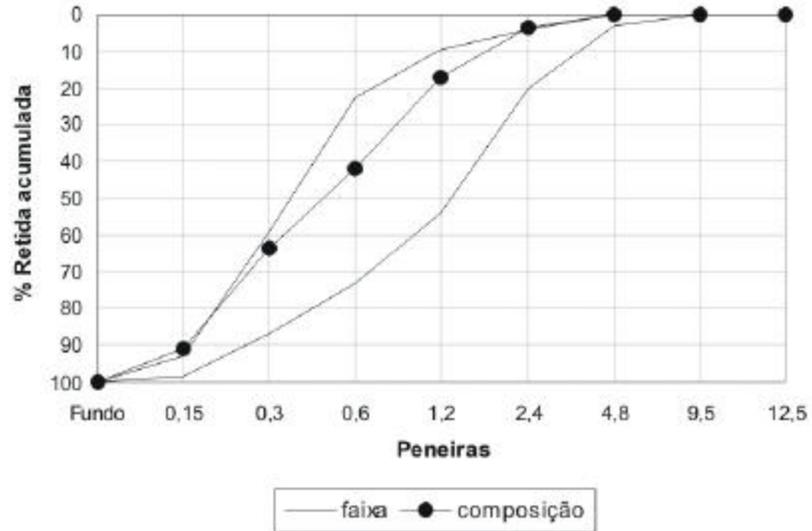


Figura 32 – Faixas granulométricas e composição do agregado miúdo

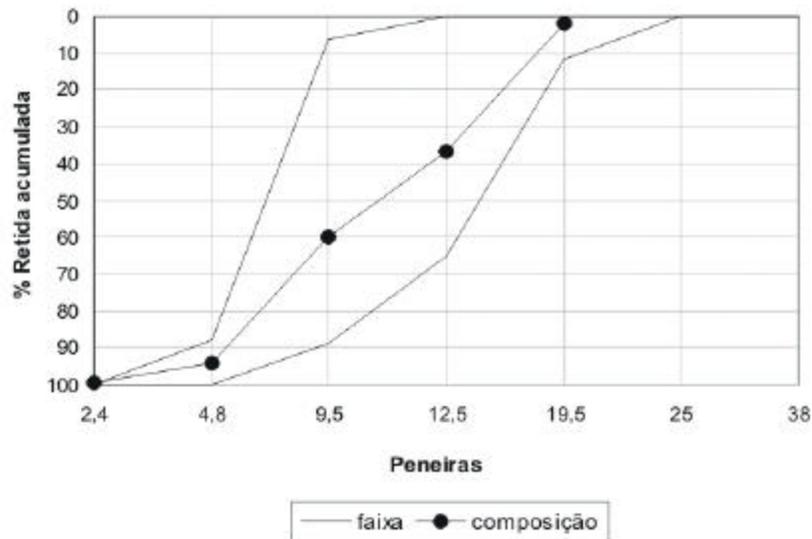


Figura 33 – Faixas granulométricas e composição do agregado graúdo

### 5.2.2 Relação água/cimento

As relações água/cimento foram determinadas em função da resistência à compressão, que foi fixada em 20, 30 e 40 MPa. O objetivo deste procedimento foi permitir a dosagem do CAA com ponto de partida na resistência à compressão desejada, permitindo que possam ser atingidos concretos com resistências normais. Desta forma, é possível evitar a produção de

misturas nas quais são atingidas elevadas resistências, em consequência dos parâmetros de dosagem adotados. Além disso, analisou-se a influência do teor de fíler calcário da mistura na resistência à compressão, pois se espera que ele não promova alterações significativas nas propriedades mecânicas do concreto.

Para essa determinação, utilizou-se a Lei de Abrams definida para concretos convencionais produzidos com os materiais da região de Florianópolis, apresentada na Equação 14. Esta expressão é dada em função da resistência à compressão aos 28 dias, e refere-se ao cimento CP V ARI RS (MELO et al., 2004).

$$a / c = 1,03 \cdot \log \left( \frac{147,32}{f_{c28}} \right) \quad (14)$$

As relações água/cimento encontradas nesta expressão e adotadas neste trabalho para a produção do CAA foram de 0,82 para o concreto de 20 MPa, 0,67 para 30 MPa e 0,55 para 40 MPa de resistência à compressão aos 28 dias.

### 5.2.3 Estudo em pasta

Após a definição dos materiais e da relação água/cimento, procedeu-se ao estudo da fase de pasta. Nesta fase, inicialmente ajustou-se o volume de fíler que seria empregado em todas as etapas seguintes. Logo após, foram realizados ensaios de fluidez para a determinação do teor de saturação do aditivo que se deu por meio de dois procedimentos: pelo ensaio do Cone de Marsh e pela avaliação das propriedades reológicas das pastas.

Os ensaios no Cone de Marsh foram realizados na sala climatizada do LMCC, cuja temperatura é mantida a  $21 \pm 2$  °C. As pastas foram misturadas em uma argamassadeira mecânica de eixo planetário (Figura 34), cujas velocidades de rotação para a pá são de  $140 \pm 5$  rpm e  $285 \pm 10$  rpm, e para o planetário de  $62 \pm 5$  rpm e  $125 \pm 10$  rpm.



Figura 34 – Argamassadeira empregada na produção das pastas

O tempo total de mistura foi de 6 minutos, adotando-se a seguinte seqüência:

- cimento e 80% da água, em velocidade lenta – 30 seg;
- adição do fíler, em velocidade lenta – 30 seg;
- mistura em velocidade rápida – 1 min;
- limpeza da pá e descanso da pasta – 3 min;
- incorporação do aditivo e restante da água, após 5 minutos do início da mistura;
- mistura final, em velocidade rápida – 1 min.

#### 5.2.3.1 Determinação do teor de finos

Para cada uma das relações água/cimento encontradas, definiu-se o teor de fíler referente à fração  $< 0,075$  mm. Esta definição se deu a partir da incorporação deste material à pasta de cimento segundo incrementos de 5%, até que se observasse a segregação da pasta. A necessidade de empregar teores de adição diferentes para cada relação água/cimento foi detectada a partir da observação de que, com o aumento da quantidade de água, era preciso um maior teor de fíler para garantir a estabilidade da mistura.

A partir do valor encontrado, variou-se o teor de fíler em 5% para mais e para menos, para que se pudesse promover um melhor ajuste em função do emprego de aditivo superplastificante nas fases seguintes. Isto se deve ao efeito de dispersão das partículas promovida pelo aditivo, que pode permitir a incorporação de um volume maior de finos.

Este estudo foi desenvolvido com o fíler F1, sendo os valores encontrados adotados também para o fíler F2. Foram obtidas nove misturas para cada tipo de fíler, cujos teores encontram-se apresentados na Tabela 10, na qual também consta a numeração que identifica estas misturas, adotada ao longo de todo o trabalho. Os teores obtidos serão analisados no Capítulo 6.

Tabela 10. – Identificação das misturas em função do teor de fíler

a/c	Mistura	Fíler (%)*
0,82	1	50
	2	55
	3	60
0,67	4	35
	5	40
	6	45
0,55	7	25
	8	30
	9	35

\* Porcentagem referente aos sólidos da pasta

#### 5.2.3.2 Determinação do teor de saturação do aditivo

##### Ensaio com o Cone de Marsh

Para todas as misturas definidas, determinou-se o teor de saturação do superplastificante por meio de ensaios realizados no Cone de Marsh. O procedimento adotado para o ensaio seguiu a recomendação de Roncero (2000), no qual o cone foi preenchido com 800 mL da pasta, medindo-se o tempo para o escoamento de 200 mL. O volume de pasta que escoou pelo funil foi medido em um recipiente graduado, e os tempos foram determinados através de um cronômetro digital. Foram feitas adições de 0,2% de aditivo, em relação à massa de cimento, considerando-se apenas o teor de sólidos apresentado na Tabela 9, até que fosse observada a segregação da pasta. Para o fíler F1, este procedimento foi realizado após 5, 15 e 30 minutos do instante de incorporação do aditivo na mistura, com o objetivo de se verificar a ocorrência

de perda de fluidez e a possível alteração no ponto de saturação, o que não foi detectado. Desta forma, para o fíler F2 o ensaio foi realizado apenas aos 5 minutos.

Para permitir a análise mais confiável dos resultados obtidos no Cone de Marsh, foi verificada sua variabilidade, por meio da repetição do ensaio em 5 pastas idênticas. As medidas foram feitas aos 5, 15 e 30 minutos, empregando-se a pasta 7, conforme a numeração adotada, com fíler F1 e teor de aditivo de 0,2%. A Tabela 11 apresenta a variação encontrada para os tempos de escoamento.

Tabela 11. – Variabilidade do Cone de Marsh

nº da repetição	5 min	15 min	30 min
1	7,28	7,75	8,34
2	7,06	6,97	7,03
3	6,32	6,94	7,13
4	7,40	7,44	8,10
5	7,32	8,16	8,90
Média	7,076	7,452	7,9
Desvio-padrão	0,44	0,52	0,80
Coefficiente de variação (%)	6,22	6,98	10,13

Observa-se que aos 5 minutos a variação máxima foi de 1,08 segundos, aos 15 minutos obteve-se 1,22 segundos de variação, e aos 30 minutos, 1,87 segundos. O ponto de saturação foi definido na curva referente aos 5 minutos de incorporação do aditivo, sendo adotado o teor a partir do qual o tempo de escoamento apresenta diferença de até 1segundo, em função da variabilidade encontrada.

Na Figura 35 abaixo, tem-se a ilustração da determinação do ponto de saturação do aditivo, no ensaio do Cone de Marsh.



Figura 35 – Ensaio do Cone de Marsh para determinação do teor de saturação do aditivo

#### Ensaios com o viscosímetro

O teor de saturação do superplastificante foi definido também por meio da avaliação das propriedades reológicas das pastas, determinando-se a viscosidade plástica ( $\eta$ ) e da tensão de escoamento ( $\tau_0$ ). Neste estudo, cada pasta foi ensaiada variando-se o teor de aditivo em torno do ponto saturação em intervalos de 0,1%, com o objetivo de encontrar uma relação entre a curva definida no Cone de Marsh e os resultados obtidos para viscosidade e/ou tensão de escoamento, que pudesse confirmar o ponto de saturação do aditivo. Além disso, avaliou-se a correlação destes parâmetros com os ensaios de espalhamento e fluidez de concretos e argamassas, verificando se foram atendidas as correlações definidas na literatura. Esta determinação foi realizada apenas nas misturas produzidas com o filer F1.

Os ensaios foram desenvolvidos no LabMat utilizando-se o viscosímetro de cilindros coaxiais<sup>7</sup>, cujo espaçamento entre os cilindros interno e externo é de 1 mm. As pastas foram misturadas manualmente, seguindo a mesma seqüência definida anteriormente, e após 5 minutos da incorporação do aditivo, procedeu-se à realização do ensaio, para o qual foram empregados 40 mL da mistura. Durante o ensaio as pastas permaneceram sob temperatura de 23°C.

Inicialmente, as pastas foram mantidas em repouso durante 30 segundos, a fim de promover sua estabilização, conforme procedimento aplicado em misturas cerâmicas. Em seguida, a taxa de cisalhamento foi variada de 1 até  $200 \text{ s}^{-1}$ , durante 120 segundos, reduzindo-se em seguida para o ponto inicial, durante o mesmo período de tempo. A análise do ensaio foi feita por meio do programa *RheoWin*<sup>®8</sup>, que acompanha o viscosímetro, o qual registra a tensão sofrida pelo cilindro interno, a partir da taxa de cisalhamento aplicada pelo cilindro externo sobre a mistura. Com estes dados, foram obtidas duas curvas de tensão de cisalhamento ( $\tau$ ) *versus* taxa de cisalhamento ( $\gamma$ ) para cada pasta: uma curva representando o trecho ascendente da taxa de cisalhamento, e outra representando o trecho descendente.

Por fim, determinou-se a tensão de escoamento e a viscosidade das pastas na curva descendente, na região com taxa de cisalhamento variando de 100 a  $1 \text{ s}^{-1}$ , que corresponde à faixa de utilização do CAA, conforme descrito no item 2.3. Estes parâmetros foram determinados aplicando-se o modelo matemático de Bingham, fornecido pelo próprio programa. Com estes dados, foram elaboradas curvas de porcentagem de aditivo em função da viscosidade e da tensão de escoamento, definindo-se como teor de saturação do aditivo o ponto a partir do qual observa-se a estabilização da curva. A Figura 36 mostra o viscosímetro utilizado na realização do ensaio.

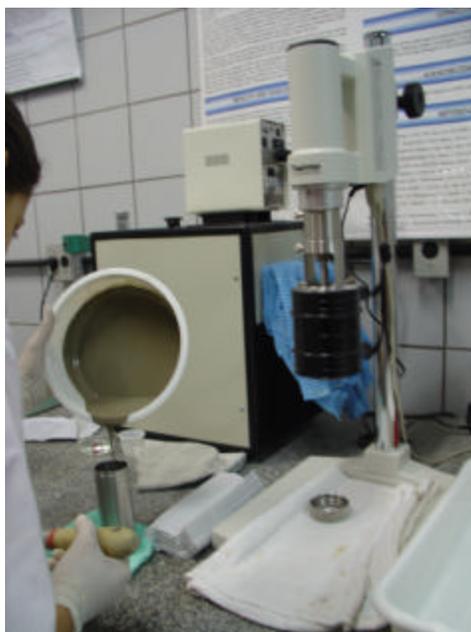


Figura 36 – Ensaio de reologia da pasta

<sup>7</sup> O viscosímetro utilizado é da marca ThermoHaak, Tipo VT550, modelo V1

<sup>8</sup> Este *software* é marca registrada da Gebrüder HAAK GmbH, da empresa ThermoHaak, desenvolvido para a análise de viscosímetros e reômetros deste mesmo fabricante. Página na Internet: [www.thermohaak.com](http://www.thermohaak.com)

#### 5.2.4 Estudo em argamassa

Concluída a etapa de pasta, passou-se para os estudos em argamassa, que consistiram na otimização do teor de agregado miúdo e no ajuste do teor de aditivo superplastificante. Nesta etapa, as argamassas foram produzidas para que se obtivessem misturas com fluidez, deformabilidade, estabilidade e resistência à compressão atendendo as características requeridas para argamassas de CAA, descritas nos itens seguintes.

Na produção das argamassas, as areias foram empregadas com teor de água superior a absorção, apresentada na Tabela 8 do item 5.1.3, para que, durante a mistura, não houvesse incorporação de água no interior do agregado, podendo ocasionar redução da fluidez. Este teor de água foi determinado por secagem ao fogo, obtendo-se a umidade total (água superficial e presente no interior das partículas), que foi empregada para corrigir a massa do agregado. O volume de água da mistura foi corrigido em função da umidade superficial do agregado, que foi reduzida da relação água/cimento. A umidade interna dos grãos foi eliminada para que se tivesse total aproveitamento da água adicionada.

Como na produção das pastas, o estudo em argamassa foi desenvolvido na sala climatizada, cuja temperatura é de  $21 \pm 2$  °C, e utilizando o mesmo misturador. O tempo total de mistura foi de 6 minutos, seguindo as etapas apresentadas abaixo:

- cimento, fíler e 80% da água, em velocidade lenta – 30 seg;
- adição do agregado miúdo, em velocidade lenta – 30 seg;
- mistura em velocidade rápida – 1 min;
- limpeza da pá e descanso da argamassa – 3 min;
- incorporação do aditivo e restante da água, após 5 minutos do início da mistura;
- mistura final, em velocidade rápida – 1 min.

##### 5.2.4.1 Determinação do teor de agregado miúdo

Foram produzidas argamassas empregando diferentes teores de agregado miúdo, com o intuito de determinar a quantidade ideal que resultasse em misturas com características adequadas de deformabilidade. A determinação se deu por meio dos ensaios de espalhamento e fluidez adaptados para argamassas, que foram realizados nas misturas com teor intermediário de fíler para cada relação água/cimento, que correspondem às de números 2, 5 e 8. Para as misturas 5 e 8 este teor variou em 35, 45 e 55%. Para a mistura de número 2, que

apresenta um teor maior de fíler, optou-se por uma faixa menor de variação do volume de areia, que ficou em 40, 45 e 50%.

Para cada um destes teores, variou-se o teor de aditivo que se deu, em geral, segundo 3 determinações com incrementos de 0,1%, sendo este intervalo de incorporação alterado para 0,05% ou 0,2% em função do comportamento observado na mistura. Esta fase do estudo foi desenvolvida com o fíler F1 e a partir da análise dos resultados, que é apresentada no Capítulo 6. Definiu-se como volume ideal de agregado miúdo em relação ao volume total de argamassa, o equivalente a 45%, que foi adotado na produção das demais argamassas e dos concretos.

#### 5.2.4.2 Determinação do teor de aditivo através dos ensaios de espalhamento e fluidez

Após a determinação do teor de agregado miúdo, foram executados ensaios de espalhamento e fluidez, para cada uma das 9 misturas em estudo. O espalhamento, foi medido por meio de um tronco de cone, sendo avaliado o diâmetro de abertura da argamassa na mesa de consistência, sem a execução de golpes. A fluidez foi determinada pelo ensaio do Funil-V, medindo-se o tempo de escoamento total da argamassa. Um aprimoramento do trabalho consistiu, na utilização de filmagens para a determinação do tempo de escoamento. Isto se deu em função da dificuldade de se fazer leituras precisas utilizando-se um cronômetro, especialmente para as argamassas mais fluidas, nas quais o tempo é muito rápido. Desta forma, para se evitar os erros de medição obtidos em função da classe de consistência e do opera . Com as filmagens, determinou-se o tempo exato de fluidez por meio de uma análise de imagens computacional.

Nesta etapa, o teor de superplastificante foi ajustado para que as misturas se enquadrassem nos critérios definidos por Edamatsu et al. (1999 apud GOMES, 2002), os quais são: diâmetro de espalhamento (d) variando de 200 mm a 280 mm, e tempo de escoamento (t) de 5 a 10 s. Verificou-se a variabilidade destes ensaios utilizando-se para isto, 5 argamassas idênticas correspondendo à mistura 6, com fíler F1 e teor de aditivo de 0,3%. Os resultados encontrados estão apresentados na Tabela 12.

Tabela 12. – Variabilidade dos ensaios de espalhamento e Funil-V em argamassa

n° da repetição	d (mm)	t (s)
1	270	16,62
2	267	11,81
3	282	11,68
4	262	15,98
5	272	15,55
Média	270,6	14,328
Desvio-padrão	7,40	2,39
Coefficiente de variação (%)	2,73	16,68

Verifica-se uma variação de 20 mm entre os resultados máximo e mínimo do ensaio de espalhamento, o que representa uma variação de  $\pm 10$  mm alargando a faixa de aceitação do ensaio para 190 a 290 mm. No caso do Funil-V, a variação de tempo encontrada foi de 5 segundos, que é muito alta considerando-se a faixa de aceitação adotada (5 a 10 segundos), isto mostra a pouca sensibilidade deste ensaio em relação às alterações sofridas pelas misturas, sendo o mesmo observado por Domone e Jin (1999). Por isso, o ajuste da argamassa quanto aos critérios de auto-compactabilidade se deu preferencialmente pelo ensaio de espalhamento, verificando-se logo após o tempo correspondente, mesmo que este não estivesse exatamente dentro da faixa definida.

As argamassas que tiveram resultados de ensaios dentro dos requisitos estabelecidos, foram moldadas para avaliação da resistência à compressão nas idades de 7 e 28 dias, sendo empregados 3 corpos-de-prova por idade. Foram utilizados moldes de 5 cm de diâmetro e 10 cm de altura, e as argamassas não sofreram adensamento na moldagem. A desmoldagem se deu com 24 horas e os corpos-de-prova permaneceram em cura úmida até a idade de rompimento. Os ensaios de resistência à compressão foram realizados na Prensa hidráulica de comando elétrico Shimadzu<sup>9</sup> (Figura 37), pertencente ao LMCC. A avaliação da resistência à compressão nas argamassas teve como objetivo verificar o atendimento dos níveis de resistência verificado inicialmente, permitindo posterior comparação dos resultados com aqueles obtidos no concreto.

<sup>9</sup> Modelo UH-2000KNA, com capacidade de 2000 kN



Figura 37 – Vista da prensa utilizada no ensaio de resistência à compressão de corpos-de-prova de argamassa

Foram avaliados ainda a massa específica real ( $\gamma_{\text{real}}$ ) das argamassas pelo processo gravimétrico, utilizando-se um molde metálico com volume de  $486 \text{ cm}^3$ . A partir deste resultado, calculou-se o teor de vazios, por meio da Equação 15.

$$\% \text{ Vazios} = \left( 1 - \frac{\gamma_{\text{real}}}{\gamma_{\text{teórico}}} \right) \times 100 \quad (15)$$

$\gamma_{\text{teórico}}$  é definido a partir das massas específicas dos materiais constituintes da mistura.

### 5.2.5 Produção do concreto

O estudo realizado no concreto consistiu inicialmente da determinação do teor e tipo do agregado graúdo, ajuste do teor de aditivo, e avaliação do concreto segundo as propriedades requeridas dos estados fresco e endurecido.

Os concretos foram produzidos no interior do laboratório e os materiais empregados foram climatizados sob temperatura de  $21 \pm 2 \text{ }^\circ\text{C}$ , com o intuito de minimizar a interferência dos fatores climáticos, já que não era possível a realização desta fase do trabalho em sala climatizada. O misturador empregado foi uma betoneira intermitente, de eixo inclinado e pás solidárias à cuba, com capacidade de cuba de 120 L, e velocidade de 29 rpm. Na Figura 38 pode-se visualizar a produção do concreto.



Figura 38 – Betoneira utilizada na produção do concreto

A produção do concreto se deu em duas etapas. Na primeira, foram produzidos 15 L de concreto para o ajuste do teor de aditivo e avaliação da perda de fluidez, na segunda, 20 L de concreto foram produzidos para a realização de ensaios nos estados fresco e endurecido. Na primeira etapa, partiu-se do teor de aditivo definido na argamassa, sendo feitas novas incorporações de acordo com o procedimento descrito posteriormente. O tempo de incorporação do aditivo foi então padronizado de forma que, na segunda etapa de produção, foram feitas também duas incorporações de aditivo seguindo esta padronização. Definiu-se então a seguinte seqüência de mistura adotada em todas as fases de estudo do concreto, que resultou no tempo total de 16 minutos:

- agregado graúdo e 80% da água – 1 min;
- cimento, fíler e 15% da água, misturados por 1 min e 30 seg;
- agregado miúdo, mistura durante 1 min e 30 seg;
- remoção do material aderido às pás e paredes da betoneira, que permanecia desligada – 3 min;
- mistura – 2 min;
- incorporação da primeira parcela do aditivo e restante da água, mistura de 3 min;
- segunda parcela do aditivo, mistura durante 4 min.

Nesta fase do estudo, devido à pequena quantidade de fíler F1 disponível, optou-se por produzir, com esta adição, os concretos 2, 4, 5, 6 e 8, podendo-se verificar a influência da

variação da relação água cimento (misturas 2, 5 e 8) e da variação do teor de fíler em uma mesma relação água/cimento (misturas 4, 5 e 6). No caso do fíler F2, foi possível produzir as nove misturas definidas.

Conforme definido na fase de argamassa, foi considerada a absorção do agregado miúdo na produção dos concretos e investigou-se necessidade de se considerar a absorção do agregado graúdo, já que esta é muito pequena. Para isto, foram produzidos concretos com o agregado graúdo na sua condição natural, seco ao ar, e na condição saturado com superfície seca, sendo avaliados através da perda de fluidez medida pelo espalhamento. Verificou-se semelhança nos resultados com as agregados nas duas condições, sendo observado que, após 30 minutos, o agregado seco apresentou redução de 155 mm no diâmetro de espalhamento e o agregado saturado 210 mm. Um estudo desenvolvido por Aarre e Domone (2003), em que se avaliou o espalhamento de concretos produzidos com agregados seco e saturado durante 90 minutos, demonstrou que a absorção de água durante este período não é significativa, havendo perda de fluidez nos primeiros 30 minutos nos dois casos. Desta forma, optou-se por utilizar o agregado graúdo na sua condição natural, facilitando assim o desenvolvimento do estudo.

#### 5.2.5.1 Ajuste do agregado graúdo

##### Definição da dimensão do agregado graúdo

Nos primeiros testes desenvolvidos no concreto, empregou-se como agregado graúdo a composição de 30% de brita 0 e 70% de brita 1, definida pelo ajuste da curva granulométrica, conforme foi descrito no item 5.2.1. Nestas misturas, pode-se observar que havia excesso de partículas de maiores dimensões, caracterizado pelo seu acúmulo no centro da região de espalhamento e pelo bloqueio na passagem pelas armaduras da Caixa-L. Para solucionar este problema, fez-se um estudo das massas unitárias no estado solto de diversas composições entre brita 0 e brita, a fim de investigar o teor de brita 0 que levasse ao menor volume de vazios. Os valores obtidos neste estudo podem ser visualizados na Tabela 13.

Tabela 13. – Massas unitárias das composições de agregado graúdo

% brita 0	% brita 1	Massa unitária (kg/dm <sup>3</sup> )
0	100	1,555
20	80	1,560
30	70	1,565
40	60	1,560
50	50	1,540
60	40	1,550
70	30	1,535
100	0	1,500

Observa-se que a variação é muito pequena e que, a partir da mistura com 40% de brita 0, tem-se uma certa estabilização da massa unitária. Adotando-se esta composição, foi desenvolvido um estudo com o intuito de determinar o teor de agregado graúdo em relação ao volume de concreto. Para isto, empregou-se a mistura de número 5, que corresponde ao traço de relação água/cimento e teor de filler intermediários. Variou-se o volume de agregado graúdo em relação ao volume total de concreto em 27, 30 e 33%, sendo avaliado em função do diâmetro de espalhamento no qual observou-se que, com o teor de agregado graúdo de 30%, foi possível atingir maior diâmetro de abertura.

Constatou-se, porém, que ainda havia concentração das partículas maiores da brita no centro da região de espalhamento. Para que isto fosse evitado, a brita passou a ser peneirada na peneira de 19,5 mm, restringindo assim as partículas maiores. Esta medida reduziu, mas não eliminou completamente a falta de uniformidade na fluidez do concreto e, por isso, optou-se por utilizar apenas brita 0 como agregado graúdo. Com isto, obteve-se um espalhamento homogêneo do concreto, com o agregado graúdo distribuído uniformemente ao longo de toda a mistura.

Verificou-se, em seguida, a adequação da curva granulométrica da brita 0 no intervalo definido no item 5.2.1, conforme Figura 39.

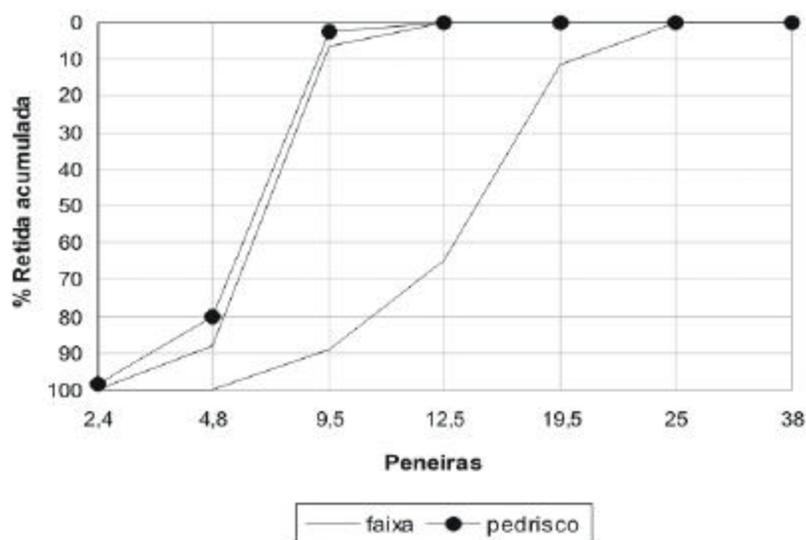


Figura 39 – Granulometria da brita 0 em relação à faixa granulométrica ideal

Observa-se que o limite definido para a granulometria do agregado graúdo não foi respeitado, embora a curva da brita 0 tenha se aproximado do limite inferior. Como as misturas empregando brita 0 apresentaram bom comportamento em relação às propriedades do CAA, optou-se por empregar este material como agregado graúdo, apesar de não haver boa adequação da sua distribuição granulométrica.

#### Definição do teor de agregado graúdo

Definida a dimensão do agregado, buscou-se investigar seu teor ideal na mistura. Utilizando-se novamente o concreto 5, variou-se o volume de brita 0 em relação ao volume total de concreto em 27, 28,5, 30, 31,5 e 33%. Estes concretos foram avaliados em termos do espalhamento, Funil-V e Caixa-L, com o objetivo de determinar o teor de agregado graúdo em que se obtivesse maior abertura e menor tempo de fluidez, conforme estudo desenvolvido por Yahia et al. (1999). Para esta análise, optou-se por empregar uma única mistura de concreto na qual a brita 0 era incorporada para atingir o volume desejado, com isto, haveria uma economia de tempo e material. Porém, nos primeiros concretos produzidos, observou-se perda rápida de fluidez, o que inviabilizava o trabalho com a mesma mistura durante um tempo superior a 30 minutos. Dessa forma, para que este estudo fosse possível, fez-se necessário utilizar um aditivo estabilizador de hidratação, sendo empregado neste trabalho o aditivo Delvo da Degussa.

A dosagem do estabilizador foi definida a partir da avaliação do tempo de manutenção do espalhamento de argamassas, partindo-se de 0,1% que, apesar de ser o teor usual deste material, não gerou bons resultados nas misturas em estudo. Este teor foi aumentado até 1%, quando se observou que a perda ocorrida foi mais lenta, pois em 1 hora o diâmetro de espalhamento diminuiu apenas em 20 mm. Com base nestes resultados, para se ter maior garantia da atuação do estabilizador, optou-se por empregar a dosagem de 5%, de forma que fosse possível manter a fluidez do concreto durante o tempo mínimo de 1 hora.

Ao final, o teor definido foi de 28,5% de brita 0, em relação ao volume de concreto, conforme resultados apresentados posteriormente.

#### 5.2.5.2 Ajuste do aditivo

Após o ajuste do agregado graúdo, foi determinado o teor de aditivo superplastificante para que fossem obtidas misturas em conformidade com os critérios de auto-compactabilidade estabelecidos para o CAA. Para isto, foram realizados os ensaios de espalhamento, Funil-V, e Caixa-L, descritos no item 4.1.

No ensaio do espalhamento, mediu-se o diâmetro de abertura do concreto em duas direções distintas referentes ao maior e menor diâmetro, como ilustra a Figura 40, tendo como resultado a média destas medidas.

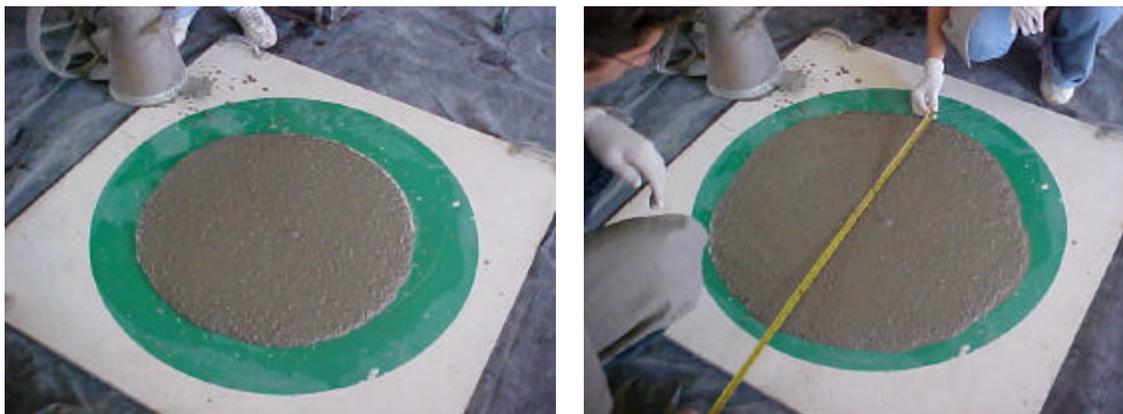


Figura 40 – Ensaio de espalhamento do concreto

Para avaliar a fluidez do concreto e a capacidade de passar por uma restrição brusca de seção, empregou-se o ensaio do Funil-V, cujo procedimento consistiu em preencher completamente o funil e medir o tempo necessário para o escoamento total do concreto, como ilustra a Figura 41.



Figura 41 – Ensaio do Funil-V

No ensaio da Caixa-L foram avaliadas duas propriedades do concreto: a capacidade de passar por seções estreitas, ou resistência ao bloqueio, e a capacidade de preenchimento. Foram utilizadas barras de aço, simulando as armaduras, sendo empregadas três barras de 12,5 mm de diâmetro, resultando no espaçamento de 40,5 mm entre as restrições. O ensaio foi realizado enchendo-se a parte vertical da caixa com a mistura e permitindo-se seu escoamento até a região horizontal. Em seguida, mediu-se a altura de concreto atingida no final da porção horizontal da caixa ( $H_2$ ) e a altura resultante na porção vertical ( $H_1$ ). Quanto mais próxima do valor unitário for esta relação, os concretos apresentam melhor capacidade de aplicação e preenchimento das formas. Após o ensaio, observava-se a ocorrência de acúmulo de agregado graúdo na região anterior à armadura. A Figura 42 ilustra a seqüência de realização do ensaio.



Figura 42 – Ensaio da Caixa-L

Os limites estabelecidos e adotados nesta dissertação para classificação do CAA, em função das definições apresentadas na literatura, encontram-se na Tabela 14 a seguir.

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

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

A incorporação de aditivo se deu em duas etapas, conforme a seqüência de mistura apresentada, partindo-se do teor obtido na argamassa acrescido de 0,05%, sendo adicionado 0,025% na segunda etapa. Quando as misturas não se enquadraram dentro dos limites dos ensaios, o ajuste foi feito com incorporações de 0,025%, promovendo-se a mistura durante 3 minutos.

### 5.2.5.3 Perda de fluidez

Observou-se a ocorrência de perda rápida de fluidez das misturas, conforme apresentado anteriormente, o que levou a um estudo complementar para sua avaliação. Após a mistura do concreto e ajuste do aditivo superplastificante por meio dos ensaios de espalhamento, Funil-V e Caixa-L, a mistura foi mantida na betoneira, permanecendo desligada durante 28 minutos, e misturada por 2 minutos, procedendo-se novamente à realização dos ensaios. Os resultados obtidos depois de decorridos 30 minutos foram comparados aos obtidos inicialmente, a fim de se avaliar a porcentagem de perda em cada um dos ensaios.

Vale ressaltar que o termo perda de fluidez, adotado neste trabalho, não se refere apenas ao ensaio do Funil-V, comumente chamado de ensaio de fluidez. O termo é empregado para definir a alteração das características do concreto no estado fresco, ao longo do tempo, também em relação aos ensaios de espalhamento e Caixa-L.

### 5.2.5.4 Caracterização dos concretos

Definidos todos os parâmetros de dosagem, os concretos foram produzidos, sendo realizados ensaios para avaliar a capacidade de preenchimento e a resistência ao bloqueio. Este acompanhamento se deu por meio de alguns dos métodos de ensaio apresentados, sendo adotados neste trabalho: espalhamento, Funil-V, e Caixa-L, conforme descrito no item anterior. Foi avaliado ainda: segregação, exsudação, teor vazios, massa específica, resistência à compressão e módulo de elasticidade.

#### Segregação

A segregação foi avaliada tanto na direção vertical como na horizontal. Na vertical ela se deu pela visualização dos corpos-de-prova rompidos durante o ensaio de resistência à compressão. Para se determinar a ocorrência de segregação na horizontal, foram coletadas duas amostras de concreto ao final do ensaio da Caixa-L, adaptando-se o procedimento adotado por Bui et al (2002) descrito no item 4.2. Neste procedimento, as amostras devem ser coletadas na região em frente às armaduras e na parte final da caixa, porém, no presente trabalho, optou-se por coletar a primeira amostra na região anterior às armaduras, para que se pudesse representar a parcela do agregado que não foi capaz de atravessar o obstáculo.

O recipiente empregado para a coleta do material também não seguiu o proposto pelo método apresentado, pois se entendia a necessidade de garantir um volume constante nas duas amostras, que permitisse comparar a quantidade de agregado existente em cada uma delas,

não sendo extremamente importante qual seria este volume. Para facilitar o trabalho, foram utilizados então, moldes cilíndricos de 5 cm de diâmetro e 10 cm de altura. As amostras foram lavadas na peneira de 4,8 mm, em seguida foram secas em estufa, e fez-se a relação entre as massas de brita 0 encontradas nas duas regiões.

### Exsudação

Na avaliação da exsudação foi empregado um molde cilíndrico de 10 cm de diâmetro e 70 cm de altura, conforme pode ser visto na Figura 43. Estas dimensões foram adaptadas do ensaio proposto por Khayat (1999) para determinar a sedimentação do CAA, apresentado no item 4.2.



Figura 43 – Molde para ensaios de exsudação, massa específica e teor de vazios

Após aproximadamente 2 horas da produção do concreto, a água existente na superfície do molde foi coletada por meio de uma seringa, em seguida, a taxa de exsudação foi calculada por meio das Equações 16 e 17, definidas na norma ASTM C 232 (2004).

$$C = \left( \frac{w}{W} \right) \times S \quad (16)$$

$$\text{Exsudação, \%} = \left( \frac{D}{C} \right) \times 100 \quad (17)$$

Onde  $C$  é a massa de água na amostra, g;  $W$  é a massa total da mistura, kg;  $w$  é a água adicionada na mistura, kg;  $S$  é a massa da amostra, g;  $D$  é a massa de água exsudada, g.

#### Massa específica e teor de vazios

A massa específica e o teor de vazios foi determinado utilizando-se o mesmo molde empregado na avaliação da exsudação. A determinação do teor de vazios se deu segundo a mesma expressão utilizada nas argamassas (Equação 15).

#### Propriedades mecânicas

Com relação às propriedades mecânicas, foram moldados, para cada mistura, 8 corpos-de-prova cilíndricos com 10 cm de diâmetro e 20 cm de altura, cuja desmoldagem se deu em 24 horas, permanecendo em cura úmida até a idade de rompimento. Assim como na moldagem dos corpos-de-prova de argamassa, não foi realizado nenhum tipo de adensamento dos concretos moldados. Após a moldagem, procedeu-se à avaliação da temperatura atingida pelo concreto, empregando-se um termômetro digital. A Figura 44 ilustra a moldagem dos corpos-de-prova e a disposição do termômetro.



(a)



(b)

Figura 44 – (a) Moldagem dos corpos-de-prova; (b) Acompanhamento da temperatura do concreto

Seis corpos-de-prova moldados foram destinados à determinação da resistência à compressão, sendo 3 corpos-de-prova aos 7 dias e 3 aos 28 dias. Dois corpos-de-prova foram utilizados na determinação do módulo de elasticidade, aos 28 dias. Estes ensaios foram realizados na mesma prensa utilizada para avaliar a resistência à compressão das argamassas. No caso da determinação do módulo de elasticidade, o corpo-de-prova foi conectado a um equipamento

dotado de dois extensômetros, os quais enviam as medidas de deslocamento para um computador ligado à prensa, que possui um programa desenvolvido para este tipo de análise. Com as leituras do deslocamento e da carga aplicada, é possível traçar a curva tensão ( $\sigma$  [MPa]) *versus* deformação ( $\epsilon$ ). Os módulos de elasticidade secante foram calculados conforme o que estabelece a utilizando-se a norma NBR 8522 (2003), através da Equação 18.

$$E = \frac{\sigma_b - \sigma_a}{\epsilon_b - \epsilon_a} \quad (18)$$

Onde:

- $\sigma_b$  é a tensão maior, referente a 30% da tensão de ruptura,
- $\sigma_a$  é a tensão básica, fixada em 0,5 MPa,
- $\epsilon_b$  é a deformação específica média correspondente à tensão maior,
- $\epsilon_a$  é a deformação específica média correspondente à tensão básica.

Na Figura 45, está ilustrado o ensaio de módulo de elasticidade realizado no concreto.



Figura 45 – Ensaio de módulo de elasticidade

## 6 APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS

Os itens abaixo apresentam os resultados obtidos em cada etapa descrita no capítulo anterior, bem como a análise dos dados e suas implicações na obtenção dos objetivos definidos.

### 6.1 Curva granulométrica dos agregados

A partir da composição granulométrica dos agregados miúdo e graúdo empregados neste trabalho, fez-se uma comparação com a faixa apresentada no item 5.2.1, obtida da literatura, conforme apresentado na Figura 46.

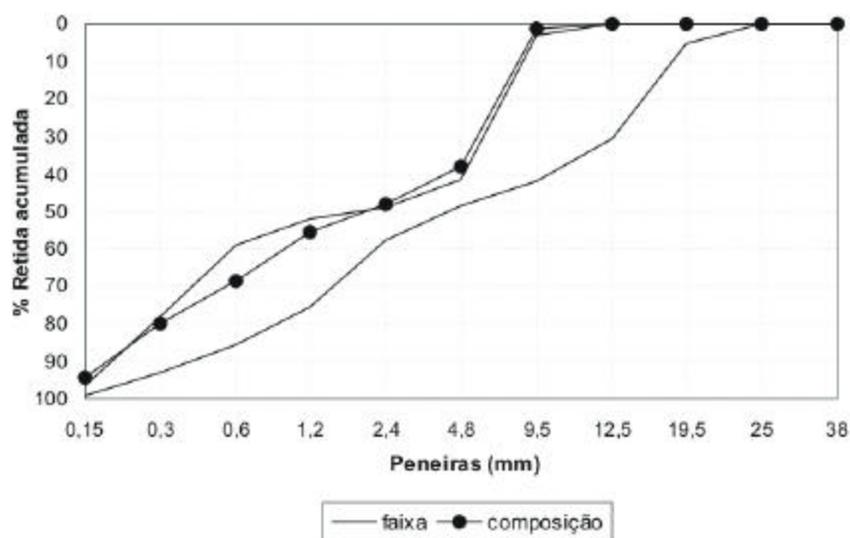


Figura 46 – Distribuição granulométrica dos agregados em relação à faixa

A distribuição granulométrica dos agregados utilizados ficou dentro da faixa estabelecida, porém muito próxima do limite inferior. Apesar dos materiais terem se apresentado adequados para a produção do CAA, sua granulometria pode ser incrementada para que se enquadre melhor dentro do intervalo ideal. Isto ocorre especialmente para o agregado graúdo, pois se observa a necessidade de mais partículas com diâmetro superior a 4,8 mm.

### 6.2 Estudo em pasta

Do estudo desenvolvido na fase de pasta, obtiveram-se os teores de filer e de aditivo superplastificante, cujos resultados e análise estão apresentados nos itens a seguir.

### 6.2.1 Teor de finos

Na determinação do teor ideal de finos para que se atingisse o limite de segregação dos sólidos (cimento e fíler), através da análise visual da pasta, chegou-se aos teores de 55% para a relação água/cimento de 0,82, 40% para 0,67 e 30% para 0,55. Como estes resultados foram obtidos sem a utilização de aditivo, foram adotados teores acima e abaixo, com variação de 5%. Este estudo foi realizado para que se pudesse verificar a possibilidade de se empregar mais fíler, devido ao efeito do aditivo superplastificante, levando à obtenção de misturas mais econômicas. Os teores definidos e a nomenclatura adotada para as misturas estão apresentados na Tabela 15.

Tabela 15. – Teores de fíler

a/c	Mis tura	Fíler (%)*
0,82	1	50
	2	55
	3	60
0,67	4	35
	5	40
	6	45
0,55	7	25
	8	30
	9	35

\* Porcentagem de fíler em relação aos sólidos da pasta

O teor de fíler aumenta com o aumento da relação água/cimento, o que indica que quanto maior o teor de água da mistura, maior a necessidade de fíler para manter a viscosidade necessária.

### 6.2.2 Teor de saturação do aditivo

#### 6.2.2.1 Ensaios com o Cone de Marsh

Na Figura 47 estão ilustradas as curvas obtidas no ensaio do Cone de Marsh, nas quais se observa a variação do tempo de escoamento das pastas em função do teor de aditivo superplastificante. Os números que acompanham as curvas representam a mistura ensaiada, conforme a identificação definida no item 5.2.3.1.

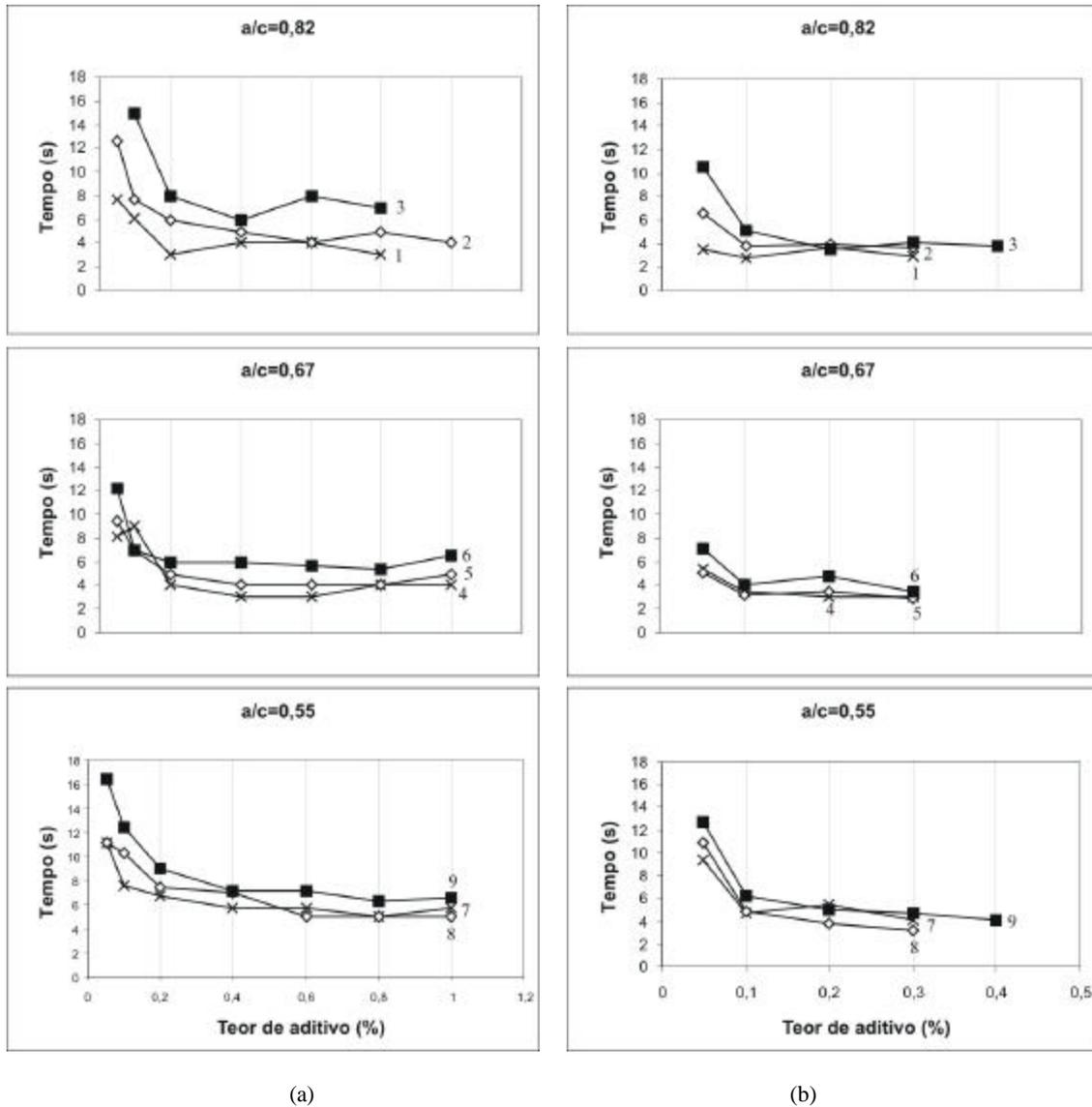


Figura 47 – Curvas resultantes do ensaio do Cone de Marsh: (a) pastas com fíler F1; (b) pastas com fíler F2

A partir destas curvas, determinou-se o ponto de saturação dos aditivos, conforme o critério adotado de variação menor que 1 segundo no tempo de escoamento. Os resultados estão apresentados na Tabela 16 a seguir. Nos Apêndices 1 e 2, tem-se os valores de todos os pontos apresentados na figura acima para o fíler F1 e fíler F2, respectivamente.

Tabela 16. – Teores de saturação do aditivo obtidos no Cone de Marsh

a/c	Mistura	Teor de saturação do aditivo (%)*	
		F1	F2
0,82	1	0,2	0,1
	2	0,2	0,1
	3	0,4	0,2
0,67	4	0,2	0,1
	5	0,2	0,1
	6	0,1	0,1
0,55	7	0,1	0,1
	8	0,2	0,2
	9	0,4	0,2

\* Porcentagem em relação à massa de cimento, considerando-se o teor de sólidos do aditivo

#### 6.2.2.2 Ensaio com o viscosímetro

Nos ensaios realizados com o viscosímetro foram obtidas curvas relacionando os parâmetros reológicos à taxa de cisalhamento aplicada, conforme a curva típica apresentada na Figura 48, correspondente à pasta 7, com teor de aditivo de 0,2%. Na figura, a curva azul representa a tensão de cisalhamento ( $\tau$  [Pa]) *versus* a taxa de cisalhamento ( $\dot{\gamma}$  [ $s^{-1}$ ]), a curva vermelha representa a viscosidade ( $\eta$  [Pas]) *versus* a taxa, e a reta preta representa o ajuste feito a partir de regressão linear com o modelo matemático de Bingham. Vale lembrar que a regressão foi realizada na curva descendente, com taxa de cisalhamento variando de 100 a  $1 s^{-1}$ .

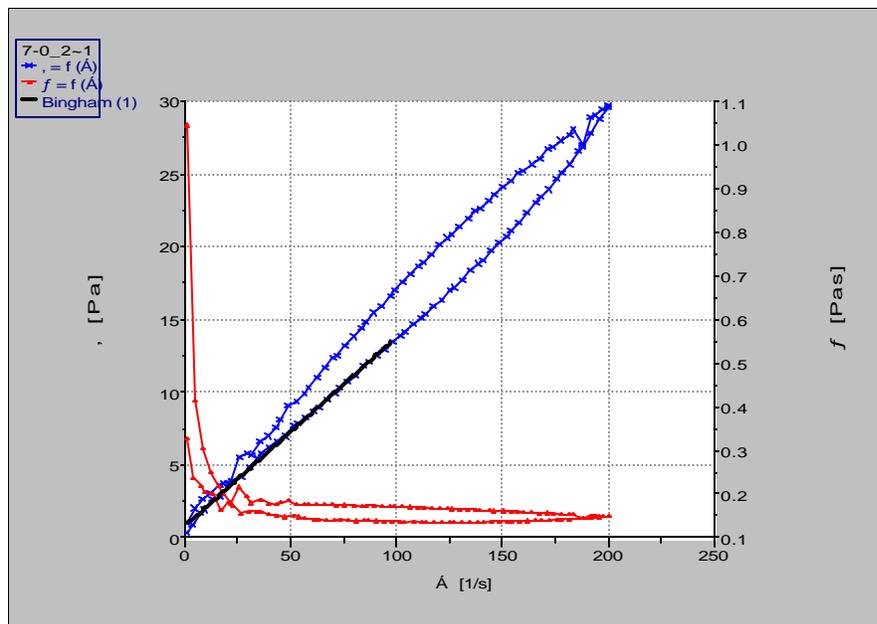


Figura 48 – Curvas obtidas no ensaio de reologia para a pasta 7 com 0,2% de aditivo

Observa-se que há uma histerese entre as curvas ascendente e descendente, com retorno para o ponto de origem, o que, segundo Banfill (1994), evidencia que houve quebra da estrutura da pasta, e pode se repetir com a continuidade do ensaio até que esta quebra seja total. Quando é identificada a desestruturação completa da mistura, assume-se que a curva descendente se ajusta ao modelo de Bingham. Como há dificuldade de se identificar esta completa desestruturação, o autor sugere que, quando todas as amostras são ensaiadas sob as mesmas condições, pode-se assumir que elas apresentam o mesmo estágio de quebra da estrutura, e desta forma, a comparação entre seus resultados é coerente. Este fato valida a análise comparativa dos resultados obtidos nas diferentes pastas, uma vez que todos foram submetidos às mesmas condições de ensaio.

A partir da regressão linear destas curvas, utilizando-se o modelo de Bingham, foi possível chegar aos valores de viscosidade ( $\eta$ ) e tensão de escoamento ( $\tau_0$ ) de todas as pastas produzidas com o filer F1 (Apêndice 3), variando-se o teor de aditivo em torno do ponto de saturação. A Tabela 17 apresenta os resultados encontrados quando o volume de aditivo corresponde aos teores de saturação obtidos no Cone de Marsh.

Tabela 17. – Viscosidade e tensão de escoamento das pastas no ponto de saturação do aditivo

a/c	Mistura	Aditivo (%)	$\eta$ (Pas)	$\tau_0$ (Pa)
0,82	1	0,2	0,093	0,138
	2	0,4	0,119	-0,022
	3	0,4	0,099	-0,033
0,67	4	0,2	0,086	0,410
	5	0,2	0,146	0,345
	6	0,2	0,125	0,847
0,55	7	0,2	0,130	0,760
	8	0,2	0,204	0,526
	9	0,4	0,184	0,035

### 6.2.2.3 Definição do teor de saturação do aditivo em função do método de ensaio

De posse dos resultados dos ensaios realizados no Cone de Marsh e no viscosímetro, foram traçadas as curvas  $\eta$  e  $\tau_0$  *versus* percentagem de aditivo, apresentadas nas Figuras 49 e 50, respectivamente, confrontando-as com os tempos de escoamento obtidos no cone.

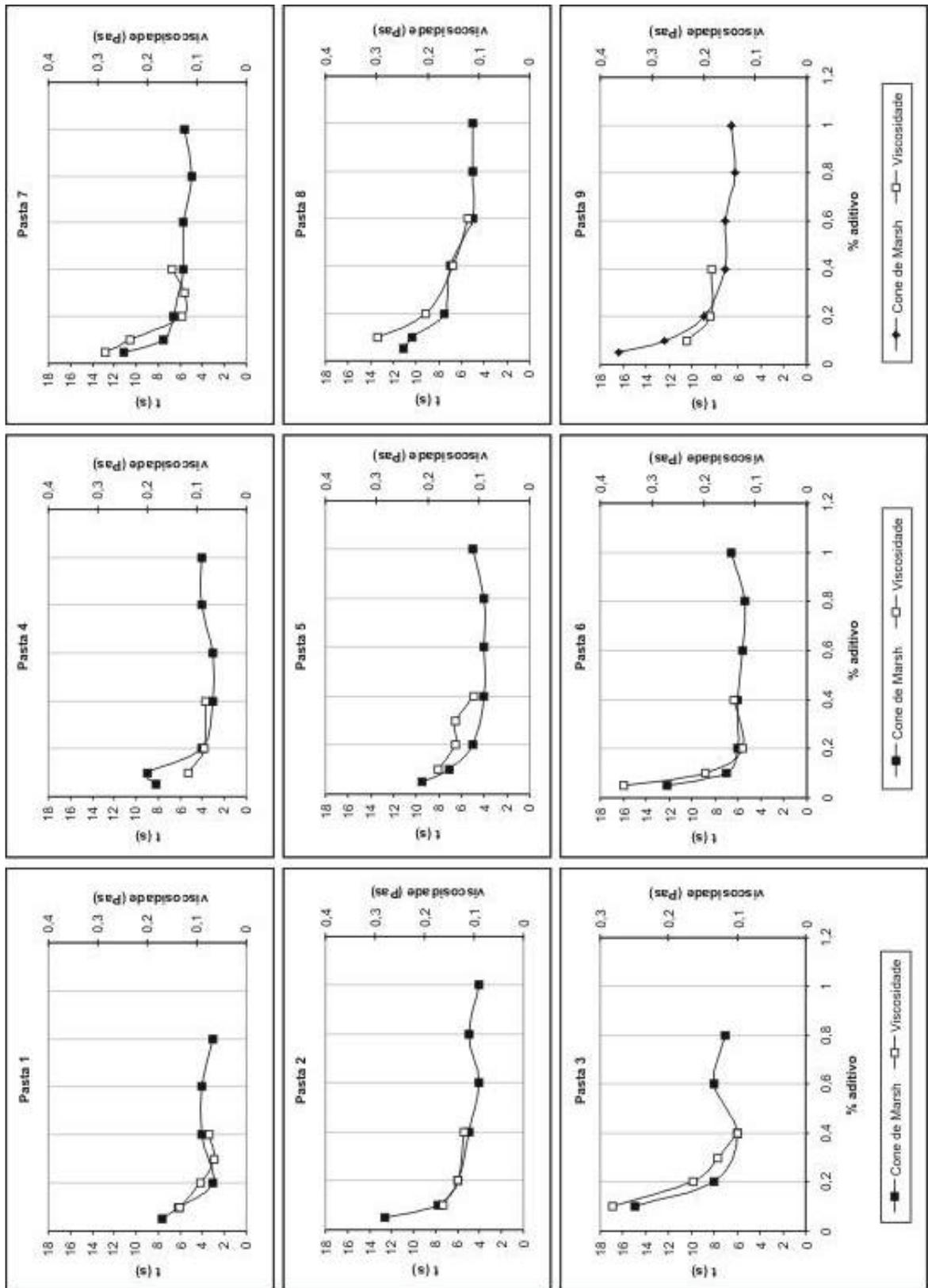


Figura 49 – Cone de Marsh (t) e viscosidade ( $\eta$ ) versus %aditivo

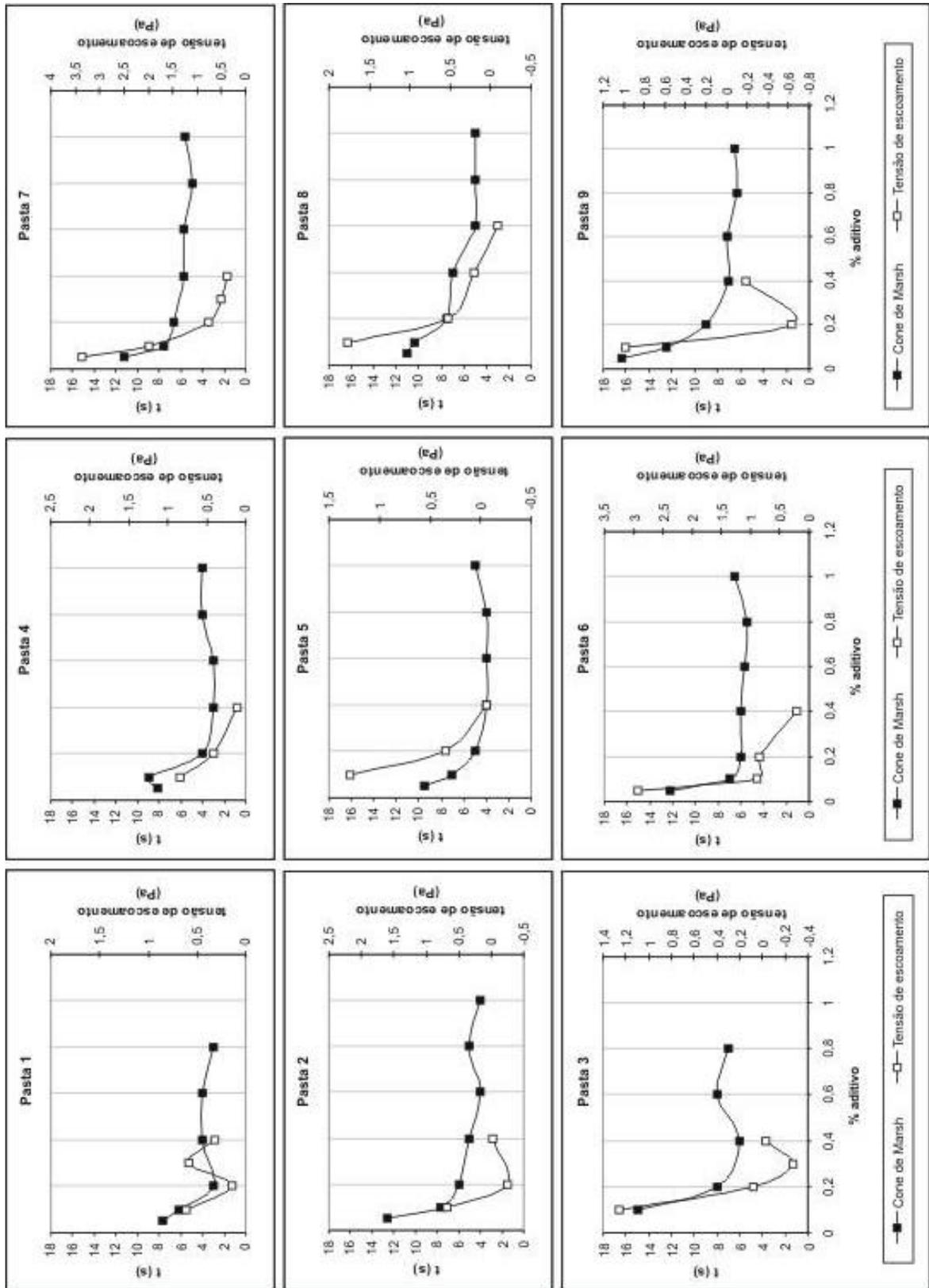


Figura 50 – Cone de Marsh ( $t$ ) e tensão de escoamento ( $\tau_0$ ) versus %aditivo

As curvas que representam a variação da viscosidade em relação ao teor de aditivo seguem uma tendência semelhante às encontradas no ensaio do Cone de Marsh. Nas curvas de tensão de escoamento, por sua vez, esta relação não é bem definida para todas as pastas. Em função disso, buscou-se determinar o ponto de saturação do aditivo a partir das curvas de viscosidade, cujo resultado encontra-se na Tabela 18. Neste caso, considerou-se o ponto em que a curva passa a ser constante, e isto se deu quando a variação da viscosidade foi menor que 0,015 Pas.

Tabela 18. – Teor de saturação do aditivo obtido pelo Cone de Marsh e pela viscosidade

Mistura	Teor de aditivo a partir do Cone de Marsh (%)	Teor de aditivo a partir da viscosidade (%)
1	0,2	0,3
2	0,2	0,2
3	0,4	*
4	0,2	0,2
5	0,2	0,2
6	0,1	0,2
7	0,1	0,2
8	0,2	0,4
9	0,4	0,2

\* Não houve estabilização da curva

Percebe-se que há diferença no ponto de saturação do aditivo em função do tipo de ensaio. Um dos fatores que poderia explicar este fato é a diferença entre a energia de mistura empregada nos dois procedimentos, já que, para as determinações no viscosímetro, a mistura das pastas foi feita de forma manual, devido ao pequeno volume de material e à falta de um misturador mecânico no local da realização dos ensaios. Este fator, por sua vez, deveria ocasionar a mesma variação de teor em todas as pastas, o que não ocorreu.

Algumas observações com relação ao ensaio do viscosímetro, podem dar indícios de problemas ocorridos nas determinações. O equipamento utilizado é do tipo cilindros coaxiais, que, conforme apresentado anteriormente, pode gerar escorregamento da pasta nas paredes dos cilindros, alterando os resultados. Nas pastas com maiores volumes de aditivo notou-se tendência de segregação, efeito que modifica a distribuição das partículas e pode gerar erros na determinação.

Com isto, não se pode fazer uma comparação precisa da determinação do teor de saturação do aditivo por meio dos dois métodos empregados. Como o ensaio do viscosímetro apresenta alguns parâmetros que não são inteiramente entendidos e controlados, deve-se investir mais neste tipo de análise, para que se possa definir claramente sua contribuição com relação à determinação do teor de aditivo.

#### 6.2.2.4 Relação entre o teor de fíler e o teor de saturação do aditivo

Analisando-se as tabelas apresentadas nos itens anteriores, observa-se que, com exceção da mistura de número 6, nas pastas de mesma relação água/cimento, quanto maior o volume de fíler, maior o teor de saturação do aditivo obtido no ensaio do Cone de Marsh. Isto acontece devido à redução da fluidez e aumento da viscosidade, decorrentes do emprego de fíler, levando a um maior consumo de superplastificante para combater este efeito.

Em geral, nas pastas produzidas com o fíler F2, o volume de aditivo necessário para se atingir a saturação foi menor que o necessário para as pastas produzidas com o fíler F1. Este fato deve estar relacionado à finura do fíler, pois apesar do fíler F1 possuir uma quantidade menor de partículas finas, sua área específica é ligeiramente maior, ou seja, por ter mais área, precisa de mais aditivo para cobrir os grãos e promover a fluidez adequada da mistura.

### **6.3 Estudo em argamassa**

#### **6.3.1 Teor de agregado miúdo**

O primeiro passo no estudo em argamassa consistiu na determinação do volume de agregado miúdo a ser empregado. Conforme descrito no item 5.5.1, para esta análise empregaram-se os traços 2, 5 e 8. A Tabela 19 mostra os resultados obtidos.

Tabela 19. – Resultados dos ensaios de auto-compactabilidade em argamassa para determinação do teor de agregado miúdo

Mistura	Agregado (%)	Aditivo (%)	Espalhamento d (mm)	Funil-V t (s)
2	40	0,1	147,5	NF
		0,2	275,0	4,53
		0,3	357,5	3,77
	45	0,25	262,5	9,41
	50	0,3	235,0	32,10
		0,4	275,0	25,00
0,6		334,0	13,00	
5	35	0,1	250,0	2,80
		0,2	375,0	1,73
		0,3	440,0	1,63
	45	0,15	225,0	6,07
		0,2	285,0	6,47
		0,3	338,5	5,27
	55	0,6	227,5	NF
		0,8	282,5	NF
8	35	0,1	279,0	3,03
		0,2	440,0	2,07
		0,3	437,5	2,23
	45	0,2	287,5	5,87
		0,3	345,0	4,93
		0,4	375,0	4,43
	55	0,3	217,5	36,14
		0,4	267,5	25,16
		0,6	323,5	22,17

NF – a argamassa não fluiu pelo funil

Nas misturas 5 e 8, pode-se constatar que, com 35% de areia, as argamassas apresentaram tempos de escoamento no funil muito baixos, mesmo com diâmetros de espalhamento dentro do limite estabelecido, observando-se ainda o risco de segregação. Isto se deve à reduzida quantidade de partículas de areia e, conseqüentemente, ao excesso de pasta. Desta forma, o atrito entre os grãos é muito pequeno, e a mistura tem grande facilidade de escoamento, o que pode ser notado pelo teor de aditivo empregado que foi de apenas 0,1%.

A situação oposta é observada nestas mesmas misturas quando o teor de areia esteve em 55%, e na mistura 2 com teor de 50%. Nestes casos, tem-se uma grande quantidade de partículas e

baixo volume de pasta, a qual fica submetida a um elevado atrito. Observa-se que as argamassas se enquadraram dentro dos limites aceitáveis no ensaio de espalhamento, mas apresentaram tempo de escoamento bastante alto ou sequer são capazes de escoar no ensaio do Funil-V. Percebe-se que o volume de aditivo empregado nestas argamassas foi elevado, mas não capaz de reduzir o tempo de escoamento no funil, tendo em vista que este ensaio é governado pela viscosidade da mistura, sobre a qual o superplastificante exerce pouca influência.

Observa-se ainda que com os teores de 40% e 45% de agregado miúdo, foram obtidos resultados satisfatórios para a argamassa de número 2.

Diante do exposto, concluiu-se que com o teor de agregado miúdo de 45% em relação ao volume de argamassa, foi possível atender, simultaneamente, os requisitos exigidos nos ensaios do Funil-V (tempo de escoamento entre 5 e 10 segundos) e espalhamento (diâmetro entre 200 e 280 mm), em todas as misturas. Nota-se que este teor é bastante utilizado em diversos estudos com CAA, apresentados na literatura (DOMONE; JIN, 1999; EDAMATSU et al., 2003; KHAYAT; GHEZAL, 2003), o que valida os resultados obtidos no presente trabalho.

### **6.3.2 Teor de aditivo**

O teor de aditivo nas argamassas foi definido para que se atingissem os critérios de auto-compactabilidade exigidos. A avaliação se deu por meio do diâmetro de espalhamento (d) e tempo de fluidez (t) no Funil-V, segundo os mesmos critérios definidos no item anterior. Na Tabela 20, apresentam-se os teores de aditivo encontrados e os resultados obtidos nestes ensaios.

Tabela 20. – Teor de aditivo e auto-compactabilidade das argamassas

Mistura	F1			F2		
	Aditivo (%)	d (mm)	t (s)	Aditivo (%)	d (mm)	t (s)
1	0,20	265	4,005	0,20	290	3,670
2	0,25	262	9,409	0,25	280	6,373
3	0,40	325	13,447	-	-	-
4	0,15	257	3,737	0,15	267	4,004
5	0,15	225	6,073	0,15	237	4,972
6	0,25	287	7,641	0,20	272	6,673
7	0,15	280	4,371	0,15	275	4,371
8	0,20	287	5,873	0,15	225	8,008
9	0,25	280	8,141	0,25	290	7,341

Na argamassa 3, produzida com filer F1, observa-se que o tempo de fluidez foi muito alto, apesar do diâmetro de espalhamento ter sido superior ao limite estabelecido. Isto ocorre devido ao elevado teor de filer empregado (60%), que é responsável por aumentar a tensão de escoamento e a viscosidade da mistura. O alto teor de aditivo utilizado atua na redução da tensão de escoamento, aumentando assim o diâmetro de espalhamento, mas não promove alteração significativa na viscosidade, refletido pelo elevado tempo de escoamento. Desta forma, esta mistura foi excluída do restante da análise, inclusive da moldagem de corpos-de-prova para ensaio de resistência à compressão.

Observa-se que, em quase todas as misturas, o teor de aditivo obtido foi o mesmo para os dois tipos de filer, sendo que as de números 6 e 8 empregaram um volume menor quando produzidas com o filer F2, repetindo o comportamento observado nas pastas. Devido à equivalência obtida no teor de aditivo entre as argamassas produzidas com as duas adições, os resultados foram confrontados a fim de investigar a relação existente, como pode ser visto nas Figuras 51 e 52 para o espalhamento e tempo de escoamento, respectivamente.

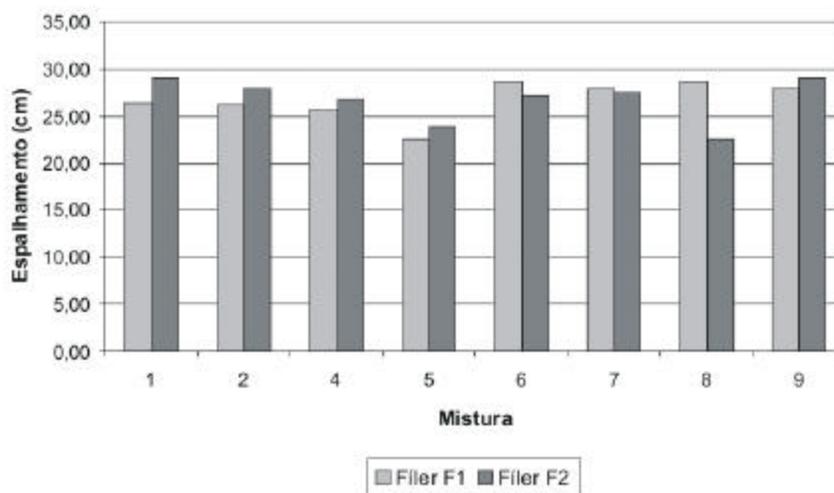


Figura 51 – Relação entre os resultados de espalhamento das argamassas em função do tipo de fíler

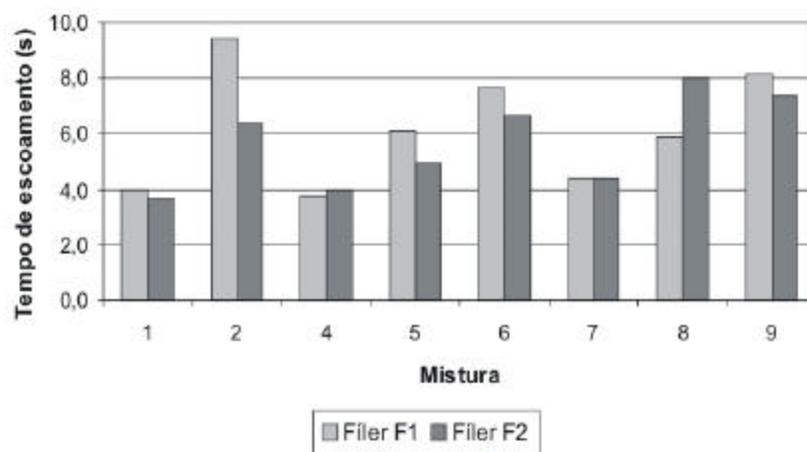


Figura 52 – Relação entre os resultados de tempo de escoamento das argamassas em função do tipo de fíler

No caso da figura referente ao espalhamento, apenas a mistura 8 apresentou diâmetro de abertura consideravelmente menor quando produzida com fíler F2, devendo-se levar em consideração que o teor de aditivo empregado também foi menor, quando comparado com a mesma argamassa produzida com fíler F1. Esta mistura novamente se destaca quando analisado o tempo de escoamento, que foi maior do que naquela produzida com o fíler F2. A argamassa de número 2 com fíler F1, por sua vez, apresentou um tempo de escoamento elevado, apesar de ter-se empregado o mesmo teor de aditivo que naquela produzida com fíler F2; além disso, os diâmetros de abertura foram bastante próximos. Estas diferenças de

resultados podem ser maiores ou menores quando se considera a variabilidade do ensaio definida no item 5.2.3.2. Os resultados obtidos para o diâmetro de espalhamento foram semelhantes para os dois tipos de filer. Em geral, as argamassas com filer F1, resultaram em menores diâmetros de abertura e maiores tempos de escoamento no funil.

Com os resultados obtidos nos ensaios de espalhamento e fluidez das argamassas, determinaram-se os parâmetros de espalhamento relativo ( $G_m$ ) e tempo de escoamento relativo ( $R_m$ ) definidos pelo Método de dosagem de Okamura e apresentados no item 3.2.1, através das Equações 9 e 10. Calculou-se também a relação entre estes parâmetros expressa na Equação 11 do mesmo item. Esta análise foi realizada com o intuito de avaliar a adequação dos resultados obtidos com a relação apresentada por Okamura para otimizar o teor de finos e de superplastificante, além de se buscar indícios para definir as misturas mais econômicas dentre as que apresentam mesma relação água/cimento. Os valores obtidos estão na Tabela 21.

Tabela 21. – Relação entre os ensaios de espalhamento e fluidez segundo critério definido no Método de dosagem de Okamura

Mistura	a/c	F1			F2		
		$R_m$	$G_m$	$R_m/G_m^{0,4}$	$R_m$	$G_m$	$R_m/G_m^{0,4}$
1	0,82	6,02	2,5	1,22	7,41	2,72	1,22
2		5,89	1,06	0,522	6,84	1,57	0,728
3		9,56	0,74	0,30	-	-	-
4	0,67	5,63	2,68	1,34	6,16	2,50	1,208
5		4,06	1,65	0,94	4,6	2,01	1,09
6		7,27	1,31	0,592	6,4	1,5	0,714
7	0,55	6,84	2,29	1,06	6,6	2,3	1,08
8		7,27	1,70	0,77	4,06	1,25	0,714
9		6,84	1,228	0,569	7,41	1,36	0,61

As argamassas que mais se aproximaram do valor definido por Okamura para  $R_m/G_m^{0,4}$ , que corresponde a 0,525, foram as de números 2, 6 e 9. Isto demonstra que a determinação do teor de filer na pasta é um bom indicativo do teor médio necessário em função da quantidade de água, porém é importante se fazer um ajuste na argamassa, para definir o teor máximo que se pode empregar sem que haja prejuízos à auto-compactabilidade das misturas. No item 6.6 será feita uma análise da implicação deste parâmetro na obtenção de concretos mais econômicos.

### 6.3.3 Resistência à compressão

A Tabela 22 mostra os resultados dos ensaios de resistência à compressão aos 7 e 28 dias, realizados nas argamassas. Os valores apresentados referem-se à média dos dois maiores resultados, dentre os 3 corpos-de-prova ensaiados, os quais estão apresentados no Apêndice 4.

Tabela 22. – Resultados de resistência à compressão das argamassas

Mistura	F1		F2	
	fc <sub>7 dias</sub> (MPa)	fc <sub>28 dias</sub> (MPa)	fc <sub>7 dias</sub> (MPa)	fc <sub>28 dias</sub> (MPa)
1	20,25	25,80	20,86	24,43
2	19,11	26,56	19,75	24,92
4	29,48	36,65	26,85	33,90
5	27,21	34,81	27,47	31,71
6	29,52	34,33	27,73	33,11
7	37,33	44,97	35,72	43,52
8	33,86	40,92	34,58	39,04
9	37,00	45,51	38,35	41,89

Na Figura 53 pode-se acompanhar os resultados e a evolução desta resistência em função dos tempos de cura, obtidos com os dois tipos de fíler. Os números que acompanham os pontos da curva indicam a mistura.

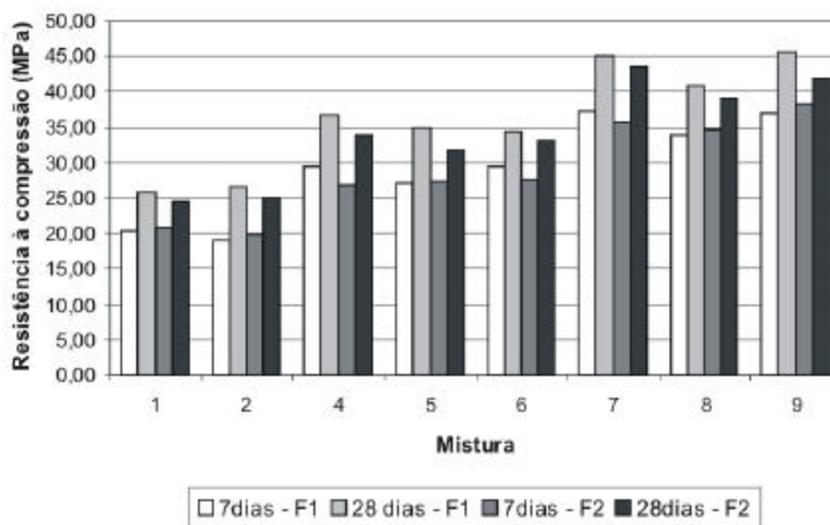


Figura 53 – Evolução da resistência à compressão das argamassas

Nota-se que todas as argamassas atingiram as resistências especificadas aos 28 dias (20 MPa para  $a/c=0,82$ , 30 MPa para  $a/c=0,67$  e 40 MPa para  $a/c=0,55$ ), exceto a argamassa 8, produzida com filer F2, embora tenha apresentado valor bem próximo ao desejado. Além disso, aos 7 dias os níveis de resistência já se aproximaram bastante do especificado, o que era esperado devido à utilização de um cimento de alta resistência inicial, e ao aumento da hidratação do cimento nas primeiras idades, promovido pelo filer. Observa-se também que, em geral, a evolução da resistência se deu de forma semelhante quando se comparam as idades de rompimento e a variação do tipo de filer, havendo predominância de maiores resistências nas argamassas que tinham filer F1 na sua composição, especialmente aos 28 dias. Este efeito provavelmente está relacionado à maior finura deste filer que aumenta a velocidade de hidratação e, conseqüentemente, a resistência à compressão, conforme descreve Heirman e Vanderwalle (2003).

#### 6.3.4 Massa específica e teor de vazios

Foram acompanhados também a massa específica ( $\gamma$ ) e o teor de vazios das argamassas, apesar destes parâmetros não serem definidores das proporções das argamassas para a confecção de CAA. Os resultados apresentados na Tabela 23 indicam que, na maioria dos casos, as misturas produzidas com o filer F1 apresentaram maior massa específica e menor teor de vazios.

Tabela 23. – Massa específica e teor de vazios das argamassas

Mistura	F1		F2	
	$\gamma$ (kg/dm <sup>3</sup> )	% Vazios	$\gamma$ (kg/dm <sup>3</sup> )	% Vazios
1	2,169	0,54	2,178	1,02
2	2,200	2,29	2,197	1,33
4	2,157	2,08	2,174	0,66
5	2,176	2,18	2,158	2,23
6	2,227	0,99	2,202	1,21
7	2,183	1,44	2,172	1,46
8	2,199	1,55	2,173	2,15
9	2,222	1,48	2,210	1,33

O teor de vazios máximo observado foi de 2,29%, o que representa um valor aceitável, conforme determina a especificação da EFNARC (2002) em 2% para o CAA.

## 6.4 Estudo em concreto

### 6.4.1 Teor de agregado graúdo

Conforme descrito no item 5.6.1, através da realização dos ensaios de espalhamento (*Slump flow*) e fluidez (Funil-V), buscou-se avaliar o teor de agregado graúdo que levasse a melhores resultados. Observou-se, porém, que aumentando-se o teor de brita 0 em 27, 28,5, 30, 31,5 e 33%, o diâmetro de espalhamento diminuía e o tempo de escoamento aumentava, não sendo possível utilizar este critério para escolha do volume de brita 0. Cada concreto foi analisado também visualmente em termos da uniformidade e estabilidade da mistura, e por este critério determinou-se como volume ideal de brita 0 o equivalente a 28,5%. Na Tabela 24 tem-se os resultados de espalhamento e tempo de escoamento obtidos neste estudo.

Tabela 24. – Resultados dos ensaios para definição do teor de agregado graúdo no concreto

Teor de agregado graúdo (%)	Espalhamento d (mm)	Funil-V t (s)
27,0	620	2,53
28,5	535	3,06
30,0	470	2,87
31,5	400	5,87
33,0	355	5,44

No estudo desenvolvido por Yahia et al (1999) fez-se análise semelhante para determinar a influência do teor de agregado graúdo no CAA, sendo adotados os ensaios do *Slump flow*, Funil-V e Caixa-U. O volume de agregado variou em 27, 30, 33 e 36% e os resultados obtidos mostraram que, com o volume de 30%, conseguiu-se maior deformabilidade da mistura. Outros autores também indicam o teor de 30% de agregado graúdo como adequado para a dosagem do CCA, podendo-se citar Khayat e Assaad (2002) e Khayat e Ghezal (2003). Portanto, o valor de 28,5%, adotado no presente trabalho, além de se mostrar eficiente para a produção do CAA com os materiais utilizados, está próximo do que tem sido apresentado na literatura.

### 6.4.2 Teor de aditivo

Na Tabela 25, tem-se o resultado do teor de aditivo obtido nos concretos a partir dos ensaios que o caracterizam quanto à sua auto-compactabilidade, que são o espalhamento (d), o Funil-V (t) e a Caixa-L ( $H_2/H_1$ ).

Tabela 25. – Teor de aditivo e auto-compactabilidade dos concretos

Mistura	F1				F2			
	Aditivo (%)	d (mm)	t (s)	H <sub>2</sub> /H <sub>1</sub>	Aditivo (%)	d (mm)	t (s)	H <sub>2</sub> /H <sub>1</sub>
1	-	-	-	-	0,275	640,0	5	0,80
2	0,35	663,3	9,97	0,89	0,3	625,0	8,67	0,80
3	-	-	-	-	0,475	662,5	13	0,94
4	0,25	665,0	4,21	0,84	0,25	652,5	4,60	0,84
5	0,275	658,3	5,77	0,98	0,25	615,0	5,55	0,85
6	0,30	610,0	6,95	0,81	0,275	640,0	7,24	0,84
7	-	-	-	-	0,25	605,0	6,76	0,80
8	0,30	650,0	9,16	0,84	0,325	640,0	8,16	0,80
9	-	-	-	-	0,325	616,7	10,00	0,79

Apesar da mistura de número 3 ter sido eliminada na etapa de argamassa, realizou-se um teste com o filer F2, a fim de verificar a possibilidade de se obter o concreto com as características desejadas. Observa-se que os requisitos do *Slump flow* e da Caixa-L se enquadraram dentro das exigências, mas o tempo de escoamento no Funil-V ficou acima do limite definido em 10s, e o volume de aditivo empregado foi bastante alto. Este resultado é idêntico ao obtido em argamassas, em que o aditivo compensou o elevado teor de filer da mistura no que diz respeito ao espalhamento, mas não promoveu redução da viscosidade, ou seja, do tempo de escoamento. Isto confirma a inviabilidade desta mistura.

Pode-se notar também que praticamente todos os traços tiveram resultados dos ensaios dentro dos limites especificados. Somente o concreto de número 9 apresentou-se um pouco abaixo do desejado, pois, apesar do teor de aditivo neste concreto ter sido elevado, o tempo de escoamento atingiu o limite máximo especificado, e a relação entre as alturas na Caixa-L esteve um pouco abaixo do mínimo.

Constatou-se que, em geral, o volume de aditivo utilizado foi menor nas misturas produzidas com o filer F2, como foi observado na pastas.

#### 6.4.3 Perda de fluidez

A porcentagem de perda de fluidez dos concretos após 30 minutos do início da mistura, obtida em cada um dos ensaios realizados, encontra-se apresentada na Tabela 26 a seguir, na qual também constam as temperaturas medidas nos corpos-de-prova com aproximadamente 40 minutos de idade.

Tabela 26. – Perda de fluidez e temperatura dos concretos

Mistura	F1			F2				
	T(°C)	Espalhamento (%)	FuniL-V (%)	Caixa-L (%)	T(°C)	Espalhamento (%)	FuniL-V (%)	Caixa-L (%)
1	-	-	-	-	23	27,90	28,57	-
2	22	29,41	32,52	45,35	25	23,18	37,77	10,71
3	-	-	-	-	22	20,44	47,37	42,17
4	22	19,53	48,98	34,48	22	26,59	22,55	48,81
5	25	29,20	27,86	64,71	22	35,74	21,27	47,62
6	23	31,36	26,34	-	24	24,12	28,38	14,89
7	-	-	-	-	23	20,97	44,44	32,14
8	26	20,80	11,28	25,32	24	17,60	11,28	22,47
9	-	-	-	-	23	26,63	41,18	37,31

Nos concretos 6 com filer F1 e 1 com filer F2, a perda de eficiência do ensaio da Caixa-L não foi apresentada porque a mistura não conseguiu atingir a extremidade horizontal da caixa, não sendo possível fazer a medição do ensaio. Pode-se observar que os maiores valores encontrados foram registrados justamente na Caixa-L, o que confirma o comportamento observado durante a caracterização dos concretos, como sendo o ensaio mais restritivo, dentre os empregados neste trabalho.

Na maior parte das misturas, a perda de fluidez foi superior a 20%. Porém, não houve homogeneidade dos resultados em relação à variação no teor de filer, teor de aditivo ou relação água/cimento. Os valores encontrados são bastante significativos, especialmente quando se considera a utilização de superplastificante nos concretos. Segundo os fabricantes destes aditivos, seu efeito na manutenção da fluidez deve durar até aproximadamente 2 horas, enquanto que os resultados obtidos neste trabalho demonstraram a ocorrência de perda já aos 30 minutos. Ressalta-se que esta perda foi expressiva, sempre suficiente para descaracterizar os concretos como auto-adensáveis.

Apesar do controle no armazenamento dos materiais utilizados, buscou-se investigar se esta perda de fluidez estava associada à temperatura ambiente sob a qual os concretos foram produzidos, que foi de 22 a 26°C. Yamada et al. (1999) indicam que temperaturas elevadas podem afetar o rendimento do aditivo superplastificante, bloqueando seu efeito de manutenção da fluidez. Porém, as temperaturas sob as quais os concretos foram desenvolvidos representam a faixa comumente observada no Brasil, o que pode caracterizar a não adequação de superplastificantes de base policarboxilato para estas condições ambientes.

Tendo em vista que as argamassas foram produzidas sob temperaturas controladas em  $21\pm 2^{\circ}\text{C}$ , avaliou-se simultaneamente a perda em argamassa e concreto de mesma relação água/cimento e teor de fíler, com teores de aditivo de 0,2% e 0,25%, respectivamente. Após 30 minutos a redução do diâmetro de espalhamento foi de 14,8% na argamassa e 16,6% no concreto, e no caso do tempo de fluidez, estes valores foram respectivamente de 41,0% e 46,3%. Isto mostra que a variação de temperatura de 22 a  $26^{\circ}\text{C}$  não foi importante para a falta de manutenção da fluidez nos concretos.

Kordtz e Breit (2003) observaram a ocorrência de perda de fluidez após 30, 60 e 120 minutos, dependendo da relação água cimento e do teor de aditivo. Segundo os autores, quanto menor a quantidade de água, maior é a perda de fluidez do CAA, que é decorrente da pequena espessura do filme de água e do surgimento de uma nova camada devido à hidratação, nas partículas de cimento. Os resultados obtidos no presente trabalho não puderam demonstrar este comportamento.

A perda de fluidez do concreto constitui um fator muito importante para a sua aplicação, pois é necessário que as características de auto-compactabilidade sejam mantidas durante todo o intervalo de tempo decorrido até o seu lançamento, para garantir o adequado preenchimento das formas. Por isso, é necessário estudar de forma criteriosa os aspectos envolvidos, buscando-se minimizar esta perda. Como não foram observadas influências da absorção dos agregados (conforme item 5.2.5), dosagem dos constituintes (especialmente do aditivo) e temperatura, que constituem fatores de muita importância para esta determinação, há necessidade de se investigar outros pontos como energia de mistura, eficiência do aditivo em função do lote e do tipo de cimento empregado.

Quanto ao cimento, deve-se destacar que a elevada finura do CP V ARI RS pode ter contribuído para a perda de fluidez, devido ao aumento na velocidade de hidratação, sendo este efeito ocasionado também pelo fíler calcário.

#### **6.4.4 Segregação e exsudação**

Na Figura 54 ilustra-se a seção de dois corpos-de-prova, após o ensaio de resistência à compressão, mostrando a distribuição do agregado graúdo, para avaliação da segregação na direção vertical.

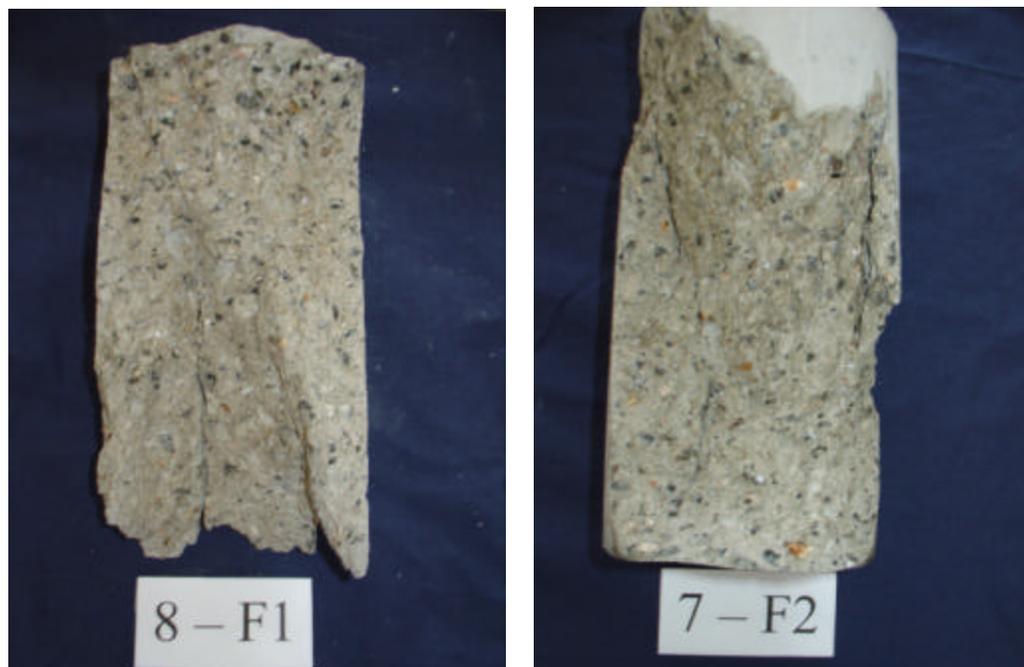


Figura 54 – Seção de corpos-de-prova após o rompimento

Observa-se que o agregado graúdo encontra-se distribuído de modo uniforme, em toda a extensão do corpo-de-prova, caracterizando ausência de segregação na direção vertical. Este comportamento foi observado em todas as misturas.

Os resultados dos ensaios de segregação na direção horizontal e exsudação, estão apresentados na Tabela 27. Nos concretos 8, com fíler F1, e 1, 4 e 8, com fíler F2, não se observou ocorrência de exsudação. Nas misturas 3, 5 e 8, com fíler F2, foram detectados erros na coleta das amostras para realização do ensaio, de forma que os resultados obtidos não foram analisados.

Tabela 27. – Resultados dos ensaios de exsudação e segregação dos concretos

Mistura	F1		F2	
	Exsudação (%)	Segregação (%)	Exsudação (%)	Segregação (%)
1	-	-	-	3,73
2	0,11	6,35	0,07	5,64
3	-	-	0,02	-
4	0,08	4,12	-	0,79
5	0,06	5,07	0,05	-
6	0,02	1,40	0,10	11,75
7	-	-	0,02	4,89
8	-	6,03	-	-
9	-	-	0,01	13,49

Um estudo desenvolvido por Shoya et al. (1999), em CAA empregando fíler calcário como adição, resultou em valores de exsudação de 0,2 e 0,3 L/m<sup>2</sup>, devendo-se salientar que o recipiente utilizado apresentava dimensões de 250 mm de diâmetro e 285 mm de altura, diferentes do empregado neste trabalho. Convertendo os valores apresentados na tabela acima para a mesma unidade, foram encontrados volumes de água de exsudação entre 0,019 e 0,15 L/m<sup>2</sup>, que são inferiores aos valores apresentados, considerados baixos pelos referidos autores.

Analisando-se a segregação, com exceção das misturas 6 e 8 produzidas com fíler F2, todas as demais apresentaram menos de 10% de diferença entre as massas de brita 0 coletadas nas duas regiões da Caixa-L, indicando a ausência de segregação na direção horizontal.

#### 6.4.5 Massa específica e teor de vazios

Na Tabela 28, tem-se os resultados relativos à massa específica ( $\gamma$ ) e ao teor de vazios dos concretos.

Tabela 28. – Massa específica e teor de vazios dos concretos

Mistura	F1		F2	
	$\gamma$ (kg/dm <sup>3</sup> )	% Vazios	$\gamma$ (kg/dm <sup>3</sup> )	% Vazios
1	-		2,216	5,10
2	2,235	5,78	2,216	5,85
3	-		2,215	6,75
4	2,256	3,44	2,195	5,67
5	2,186	7,06	2,186	6,57
6	2,262	4,59	2,213	6,08
7	-		2,247	3,88
8	2,242	4,98	2,205	6,15
9	-		2,235	5,45

A diferença entre as massas específicas dos concretos é pequena quando se varia o tipo de fíler. O mesmo foi observado o mesmo em relação ao teor de vazios, o qual varia entre 3,4 e 7%, ficando dentro da faixa definida pelo Método de dosagem de Okamura, apresentado no item 3.2.1.

#### 6.4.6 Resistência à compressão e módulo de elasticidade

A partir dos ensaios de resistência à compressão e módulo de elasticidade realizados no concreto, foram obtidos os resultados apresentados na Tabela 29. Assim como nas argamassas, a resistência foi obtida a partir da média dos dois maiores valores obtidos no ensaio, e o módulo resultou da média dos 2 corpos-de-prova ensaiados, sendo os resultados apresentados nos Apêndices 5 e 6, respectivamente.

Tabela 29. – Propriedades mecânicas dos concretos

Mistura	F1			F2		
	$f_{c7 \text{ dias}}$ (MPa)	$f_{c28 \text{ dias}}$ (MPa)	$E_c$ (GPa)	$f_{c7 \text{ dias}}$ (MPa)	$f_{c28 \text{ dias}}$ (MPa)	$E_c$ (GPa)
1	-	-	-	18,54	24,79	25,54
2	22,03	26,27	25,24	19,29	25,64	25,36
3	-	-	-	21,12	26,93	27,92
4	28,22	35,32	26,13	26,66	34,15	26,15
5	29,06	33,42	28,78	26,31	28,29	63,00
6	27,11	35,74	27,89	25,03	31,32	25,53
7	-	-	-	37,22	41,80	28,59
8	32,97	45,04	31,15	38,05	44,79	29,31
9	-	-	-	39,64	46,12	31,68

Na Figura 55 pode-se acompanhar a evolução da resistência à compressão dos concretos.

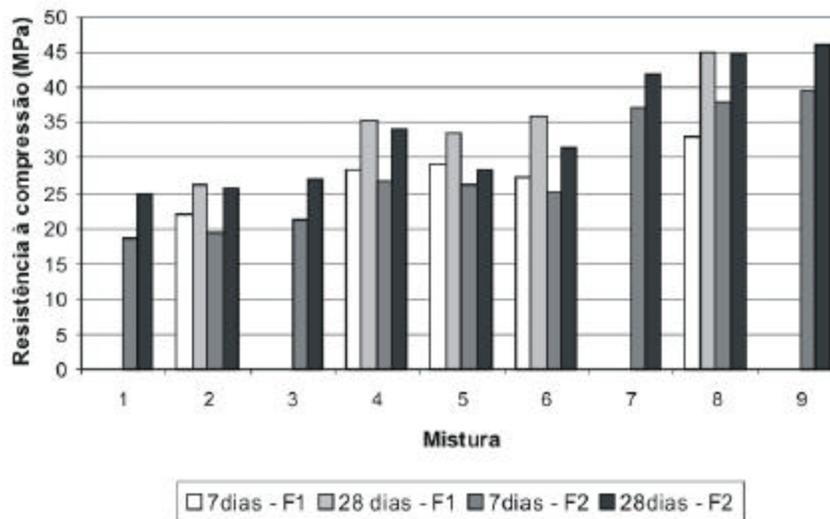


Figura 55 – Resistência à compressão de todas as misturas de concreto aos 7 e 28 dias

A evolução da resistência à compressão se dá de forma semelhante, tanto em relação à idade de rompimento, como ao tipo de fíler utilizado. Sendo que, na maioria das misturas, os concretos produzidos com fíler F1 apresentaram maiores resistências, conforme observado nas argamassas.

Quanto ao módulo de elasticidade, as misturas apresentaram resultados semelhantes entre si, sendo observado um crescimento em função da redução da relação água/cimento. Apenas o concreto de número 5, produzido com fíler F2, atingiu um valor bastante elevado, fugindo da previsão para este concreto. Os resultados experimentais foram confrontados com os valores calculados em função da resistência à compressão, conforme preconizado pela NBR 6118 (2004) através da Equação 19.

$$E = 5600 \cdot \sqrt{f_{ck}} \quad (19)$$

Os valores obtidos são mostrados na Tabela 30 abaixo.

Tabela 30. – Módulo de elasticidade obtido experimentalmente e a partir da NBR 6118 (2004)

Mistura	F1		F2	
	Ec (GPa) experimental	Ec (GPa) NBR 6118	Ec (GPa) experimental	Ec (GPa) NBR 6118
1	-	-	25,54	27,88
2	25,24	28,70	25,36	28,36
3	-	-	27,92	29,06
4	26,13	33,28	26,15	32,72
5	28,78	32,38	63,00	29,79
6	27,89	33,48	25,53	31,34
7	-	-	28,59	36,20
8	31,15	37,58	29,31	37,48
9	-	-	31,68	38,03

Os resultados obtidos experimentalmente foram inferiores aos valores definidos segundo a expressão de norma, o que foi mais evidenciado nos concretos com menor relação água/cimento. Isto indica que a expressão empregada não é adequada para a avaliação do módulo de elasticidade de CAA, tendo em vista que nestes concretos o teor de agregado é menor do que o usualmente utilizado nos concretos convencionais. Desta forma, vê-se a necessidade de uma investigação mais detalhada para melhor entendimento do comportamento do CAA em relação ao módulo de elasticidade.

### **6.5 Análise dos resultados com relação à otimização da dosagem**

Neste item serão analisados os requisitos relacionados à dosagem dos materiais no CAA, em função dos resultados obtidos nos ensaios descritos nas etapas anteriores.

#### **6.5.1 Teor de finos**

De acordo com os resultados apresentados e analisados nos itens anteriores, percebe-se que os teores médios de fíler, para cada água/cimento, definidos em função da segregação da pasta, levaram à produção de misturas dentro dos critérios desejados. Deve-se ressaltar, porém, o teor de 60% empregado com relação água/cimento de 0,82, que promoveu uma excessiva viscosidade, impedindo a obtenção do CAA.

### 6.5.2 Teor de aditivo

A Tabela 31 traz o resumo dos teores de aditivo obtidos nas fases de pasta, argamassa e concreto, devendo-se destacar que a mistura de número 3 não foi incluída nas fases de argamassa e concreto, já que ela não atendeu aos critérios de auto-compactabilidade.

Tabela 31. – Teor de aditivo das fases de pasta, argamassa e concreto

Mistura	Teor de aditivo (%)						
	F1				F2		
	Pasta (Cone de Marsh)	Pasta (viscosidade)	Argamassa	Concreto	Pasta	Argamassa	Concreto
1	0,2	0,3	0,20	-	0,1	0,20	0,275
2	0,2	0,2	0,25	0,35	0,1	0,25	0,3
3	0,4	-	-	-	0,2	-	-
4	0,2	0,2	0,15	0,25	0,1	0,15	0,25
5	0,2	0,2	0,15	0,275	0,1	0,15	0,25
6	0,1	0,2	0,25	0,30	0,1	0,20	0,275
7	0,1	0,2	0,15	-	0,1	0,15	0,25
8	0,2	0,4	0,20	0,30	0,2	0,15	0,325
9	0,4	0,2	0,25	-	0,2	0,25	0,325

Nas Figuras 56 a 58 estão ilustrados graficamente os resultados acima apresentados, para o fíler F1 e F2, respectivamente.

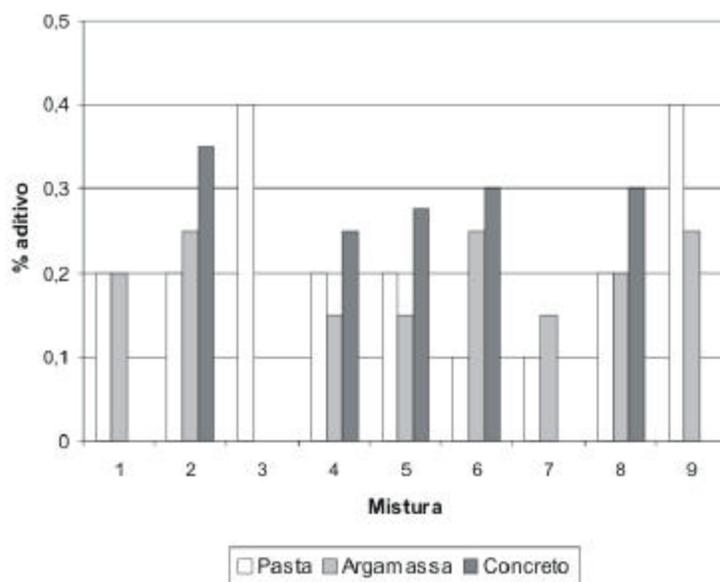


Figura 56 – Teor de aditivo de pasta pelo Cone de Marsh, argamassa e concreto, com fíler F1

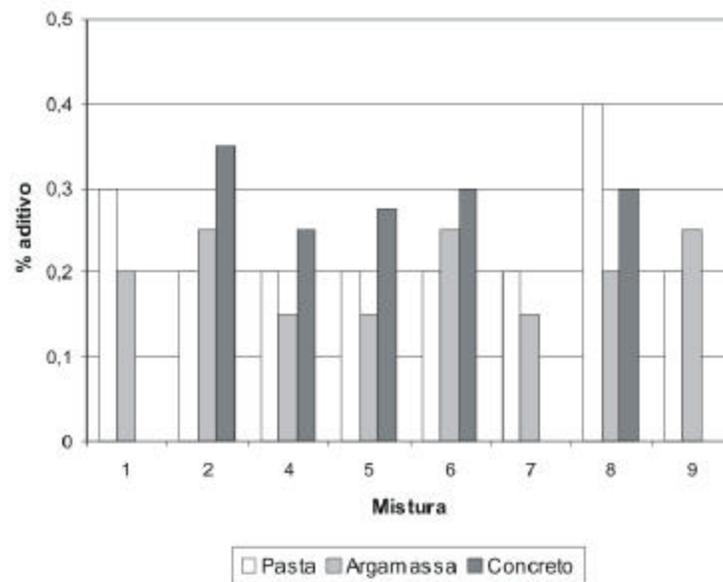


Figura 57 – Teor de aditivo de pasta pelo viscosímetro, argamassa e concreto, com filer F1

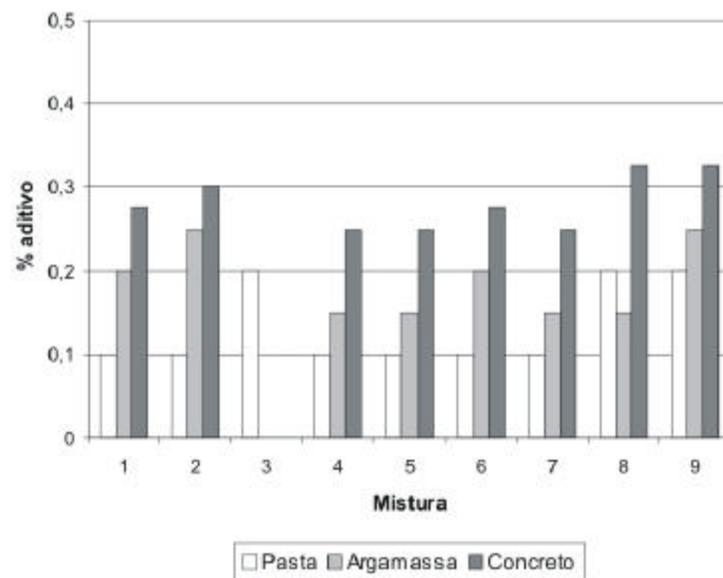


Figura 58 – Teor de aditivo de pasta, argamassa e concreto, com filer F2

Nos resultados representativos do filer F1, comparando-se as fases de pasta e argamassa, nota-se que os resultados não são muito coerentes, pois não há uma evolução parecida entre as duas curvas, tanto em função dos resultados do Cone de Marsh, como em relação ao ensaio com viscosímetro. Além disso, em boa parte das misturas, os teores de aditivo da pasta estiveram acima dos empregados pela argamassa, nas duas determinações. No caso do concreto, como

só 5 misturas foram ensaiadas, há dificuldade de relacionar seus resultados com os obtidos em pasta e argamassa.

Na análise da figura referente ao fíler F2, observa-se certa coerência entre as três fases estudadas, com uma evolução semelhante, especialmente quando são comparados os resultados obtidos em argamassa e em concreto. Percebe-se que o ensaio do Cone de Marsh foi eficiente para a determinação do ponto de saturação do aditivo quando empregado este fíler. Além destas observações, a maioria dos trabalhos encontrados na literatura utilizam o ensaio do Cone de Marsh para a determinação do teor de saturação do aditivo (GOMES, 2002; RONCERO, 2000) em relação ao emprego do viscosímetro para este fim.

Na Tabela 32 abaixo, encontra-se o acréscimo de aditivo necessário na passagem de pasta para argamassa e de argamassa para concreto, das misturas produzidas com fíler F2.

Tabela 32. – Diferença no teor de aditivo entre as fases de pasta, argamassa e concreto para o fíler F2

a/c	Mistura	Fíler (%)	Diferença no teor de aditivo (%)	
			Pasta – Argamassa	Argamassa – Concreto
0,82	1	50	0,10	0,075
	2	55	0,15	0,05
0,67	4	35	0,05	0,10
	5	40	0,05	0,075
	6	45	0,10	0,10
0,55	7	25	0,05	0,175
	8	30	-0,05	0,075
	9	35	0,05	0,075

Nota-se que, passando da fase de pasta para a argamassa, não há muita definição quanto ao acréscimo de aditivo necessário, sendo que para as relações água/cimento de 0,82 e 0,67, este valor cresce com o aumento no teor de fíler. Analisando-se, por sua vez, a relação entre o percentual de aditivo para passar da argamassa para o concreto, é possível observar que, excetuando-se as misturas 2 e 8, todas as demais necessitam de 0,075 ou 0,10% de incorporação de aditivo.

Estes resultados demonstram que, apesar do teor de aditivo determinado na fase de pasta ter servido como ponto de partida para seu ajuste na argamassa, não dá para estimar o consumo no concreto, portanto, seu emprego é desnecessário para este fim. Desta forma, propõe-se que a primeira determinação do aditivo ocorra na fase de argamassa, que, além de ser necessária

para a determinação do teor de agregado miúdo, é um bom indicativo da quantidade de aditivo que deve ser empregada no concreto.

A maior necessidade de aditivo quando se aumenta o volume de material sólido na mistura, passando-se de pasta para argamassa e concreto, está relacionada com o aumento na quantidade de partículas, que precisam ser cobertas pelo aditivo para que a dispersão seja eficiente e promova a fluidez da mistura.

### 6.5.3 Auto-compactabilidade e reologia

Na Figura 59 encontram-se as relações entre os resultados de espalhamento e tempo de fluidez obtidos para as misturas de mesma relação água/cimento e teor de filer, produzidas em concreto e argamassa. Esta análise tem o intuito de verificar se os parâmetros desejados para o concreto podem ser obtidos a partir dos ensaios de argamassa.

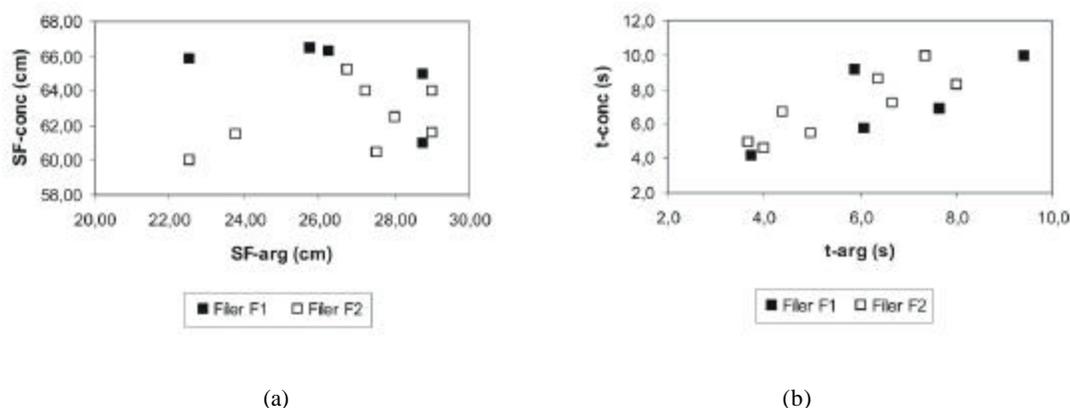


Figura 59 – Relação entre os resultados obtidos em concretos e argamassas: (a) diâmetro de espalhamento; (b) tempo de escoamento no Funil-V

Pode-se observar que, na curva referente ao espalhamento, não há relação entre os diâmetros de abertura obtidos em concretos e argamassas, ao contrário do que ocorre com os resultados obtidos no Funil-V, em que se observa a tendência de uma relação linear. Alguns trabalhos demonstram que existe uma relação linear tanto do diâmetro de abertura como do tempo de fluidez no Funil-V em concretos e argamassas, quando se emprega o mesmo teor de aditivo (JARAMILLO et al., 2003; YAHIA et al., 1999).

No presente trabalho, apesar do teor de aditivo ter sido diferente para argamassas e concretos, esta diferença foi constante para a maioria das misturas, o que poderia levar a existência de uma relação entre os resultados dos ensaios. Não se sabe, porém, se deve ser obedecido o

mesmo comportamento apresentado na literatura em função desta uniformidade na variação do teor de aditivo entre as fases de argamassa e concreto. Isto demonstra que, adotando-se o processo de dosagem proposto neste trabalho, a caracterização dos concretos não pode ser completamente estimada em função dos resultados obtidos em argamassa, desta forma, é necessário realizar todos os ensaios preconizados para avaliar a auto-compactabilidade do concreto.

Diversos estudos encontrados na literatura, têm buscado apresentar a relação entre as propriedades reológicas do CAA, nas fases de pasta, argamassa ou concreto, com os resultados dos ensaios que definem sua auto-compactabilidade. Sabe-se que a deformabilidade do CAA, medida pelo espalhamento, está relacionada com a sua tensão de escoamento, por outro lado, o tempo de fluidez obtido no Funil-V relaciona-se com a viscosidade. A fim de avaliar este comportamento com os resultados obtidos no presente trabalho, e com isto verificar a possibilidade de se determinar as características da argamassa e/ou do concreto a partir da reologia da pasta, as Figuras 60 e 61 apresentam a relação entre as propriedades reológicas das pastas com os resultados de auto-compactabilidade obtidos nas argamassas e nos concretos, respectivamente. Vale ressaltar que este estudo foi realizado apenas nas misturas produzidas com fíler F1, sendo excluída a argamassa de número 3, e os concretos 1, 3, 7 e 9, conforme descrito nos itens anteriores.

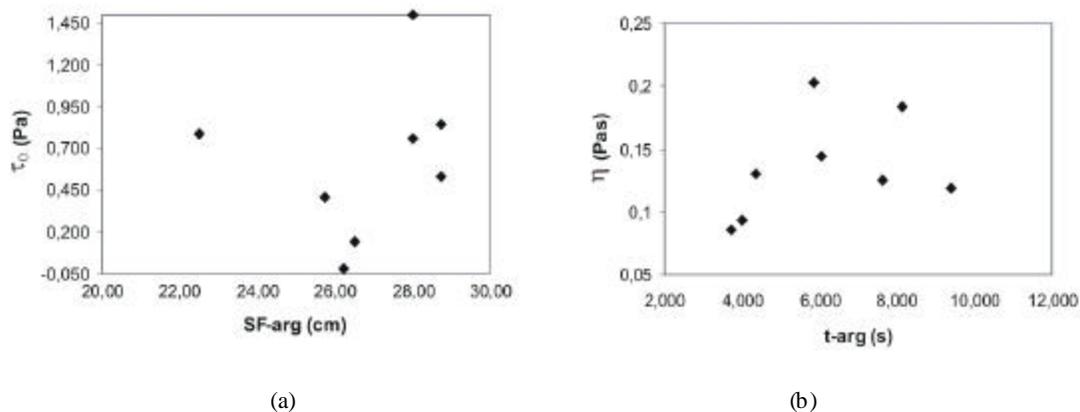


Figura 60 – Relação entre pasta e argamassa: (a)  $\tau_0$  versus diâmetro de espalhamento; (b)  $\eta$  versus tempo de escoamento

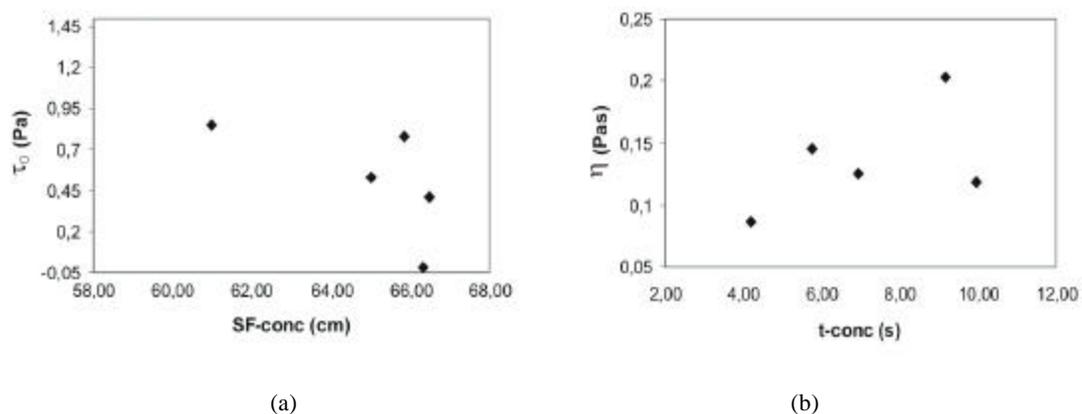


Figura 61 – Relação entre pasta e concreto: (a)  $\tau_0$  versus diâmetro de espalhamento; (b)  $\eta$  versus tempo de escoamento

Os parâmetros reológicos da pasta não apresentam uma boa relação quando comparados com os resultados de auto-compactabilidade das argamassas. Quando se analisam os resultados dos concretos, observa-se, ao contrário, uma tendência linear em relação aos ensaios de reologia. No entanto, a quantidade de dados é muito pequena, o que torna esta análise menos confiável. Desta forma, neste trabalho, a avaliação das propriedades da argamassa e do concreto a partir da reologia das pastas não pode ser feita de forma muito precisa. Novos estudos podem ser feitos com o viscosímetro, por sua vez, para tentar ajustar melhor os parâmetros reológicos da pasta ao comportamento do concreto, buscando uma possível relação que permita o aprimoramento da dosagem.

#### 6.5.4 Resistência à compressão

Nas Figuras 62 e 63 abaixo, tem-se as curvas de resistência à compressão de argamassas e concretos, empregando fíler F1 e F2, respectivamente.

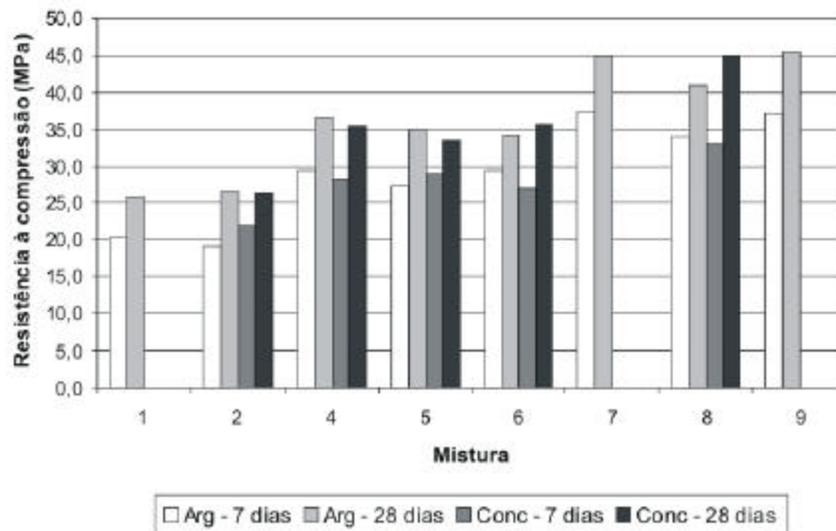


Figura 62 – Resistência à compressão de argamassas e concretos com filer F1

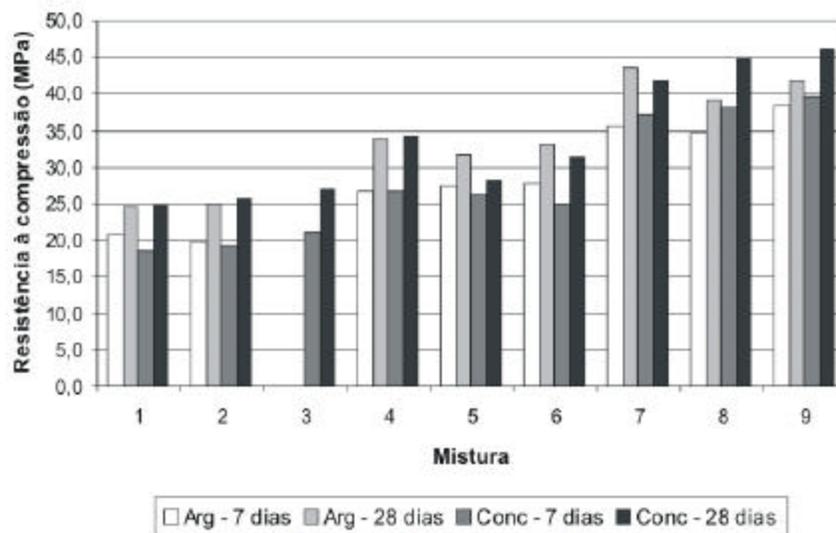


Figura 63 – Resistência à compressão de argamassas e concretos com filer F2

Os resultados de resistência à compressão em argamassas e concretos foram semelhantes entre si, o que já era esperado tendo em vista que, nas misturas de mesma relação água/cimento e teor de filer, o volume de água utilizado foi o mesmo nas duas fases, sendo definido justamente em função da resistência desejada. Isto indica que, no que diz respeito ao processo de dosagem, não há necessidade de se analisar a resistência à compressão das argamassas. Porém, este estudo é importante para identificar possíveis erros e permitir o ajuste antes de se passar para o concreto. Esta avaliação pode ser feita aos 7 dias de idade.

## 6.6 Dosagem dos materiais

### 6.6.1 Proporcionalamento e consumos

Após todo o estudo apresentado, foram obtidos os traços, em massa, empregados na produção do CAA com fíler F1 e fíler F2, apresentados nas Tabelas 33 e 34, respectivamente.

Tabela 33. – Traços em massa dos concretos produzidos com fíler F1

Mistura	a/c	Fíler	Areia fina	Areia média	Brita 0
1	0,82	1,617	0,524	2,096	2,898
2		1,967	0,530	2,119	3,040
3		2,417	0,537	2,149	3,222
4	0,67	0,867	0,447	1,788	2,303
5		1,067	0,450	1,801	2,384
6		1,317	0,454	1,818	2,485
7	0,55	0,533	0,390	1,560	1,935
8		0,683	0,392	1,570	1,996
9		0,867	0,395	1,582	2,070

Tabela 34. – Traços em massa dos concretos produzidos com fíler F2

Mistura	a/c	fíler	Areia fina	Areia média	Brita 0
1	0,82	0,97	0,643	2,573	2,902
2		1,18	0,675	2,700	3,045
3		1,45	0,716	2,863	3,229
4	0,67	0,52	0,511	2,044	2,305
5		0,64	0,529	2,116	2,387
6		0,79	0,552	2,207	2,489
7	0,55	0,32	0,429	1,717	1,937
8		0,41	0,443	1,771	1,998
9		0,52	0,459	1,838	2,073

Observa-se que a quantidade de fíler é maior quando empregado o fíler F1, devido à correção da granulometria deste material. Pelo mesmo motivo, estes concretos apresentam menor massa de agregado miúdo.

Nas Tabelas 35 e 36, tem-se os consumos destes materiais em massa, nos concretos produzidos com fíler F1 e F2, respectivamente. Nas Tabelas 37 e 38 são apresentadas estas relações em volume.

Tabela 35. – Consumos dos materiais na produção do CAA com filer F1, em massa

Mistura	a/c	a/finos	Cimento (kg/m <sup>3</sup> )	Filer < 0,075 mm (kg/m <sup>3</sup> )	Filer > 0,075 mm (kg/m <sup>3</sup> )	Areia fina (kg/m <sup>3</sup> )	Areia média (kg/m <sup>3</sup> )	Ag. miúdo (kg/m <sup>3</sup> )	Brita 0 (kg/m <sup>3</sup> )
2	0,82	0,38	250,82	295,97	197,31	132,87	531,49	857,60	762,38
4	0,67	0,44	331,05	172,15	114,76	147,98	591,91	850,12	762,38
5		0,41	319,79	204,66	136,44	144,01	576,04	852,08	762,38
6		0,37	306,76	242,34	161,56	139,42	557,66	854,36	762,38
8	0,55	0,39	381,96	156,60	104,41	149,87	599,50	849,19	762,38

Tabela 36. – Consumos dos materiais na produção do CAA com filer F2, em massa

Mistura	a/c	a/finos	Cimento (kg/m <sup>3</sup> )	Filer (kg/m <sup>3</sup> )	Areia fina (kg/m <sup>3</sup> )	Areia média (kg/m <sup>3</sup> )	Ag. miúdo (kg/m <sup>3</sup> )	Brita 0 (kg/m <sup>3</sup> )
1	0,82	0,42	263,10	255,21	168,98	675,92	839,72	762,38
2		0,38	250,82	295,97	168,98	675,92	839,72	762,38
3		0,33	236,62	343,10	168,98	675,92	839,72	762,38
4	0,67	0,44	331,05	172,15	168,98	675,92	839,72	762,38
5		0,41	319,79	204,67	168,98	675,92	839,72	762,38
6		0,37	306,76	242,34	168,98	675,92	839,72	762,38
7	0,55	0,42	393,96	126,07	168,98	675,92	839,72	762,38
8		0,39	381,96	156,60	168,98	675,92	839,72	762,38
9		0,36	368,25	191,49	168,98	675,92	839,72	762,38

Tabela 37. – Consumos dos materiais na produção do CAA com filer F1, em volume

Mistura	a/c	a/finos	Aditivo (L/m <sup>3</sup> )	Filer < 0,075 mm (L/m <sup>3</sup> )	Filer > 0,075 mm (L/m <sup>3</sup> )	Areia fina (L/m <sup>3</sup> )	Areia média (L/m <sup>3</sup> )	Ag. miúdo (L/m <sup>3</sup> )	Brita 0 (L/m <sup>3</sup> )
2	2,44	1,08	2,692	103,13	68,75	49,83	201,62	251,45	284,47
4	1,99	1,28	2,538	59,98	39,99	55,50	224,54	280,04	284,47
5		1,18	2,697	71,31	47,54	54,01	218,52	272,53	284,47
6		1,08	2,822	84,44	56,29	52,29	211,54	263,83	284,47
8	1,63	1,13	3,514	54,56	36,38	56,21	227,41	283,62	284,47

Tabela 38. – Consumos dos materiais na produção do CAA com fíler F2, em volume

Mistura	a/c	a/finos	Aditivo (L/m <sup>3</sup> )	Fíler (L/m <sup>3</sup> )	Areia fina (L/m <sup>3</sup> )	Areia média (L/m <sup>3</sup> )	Ag. miúdo (L/m <sup>3</sup> )	Brita 0 (L/m <sup>3</sup> )
1	2,44	1,20	2,219	89,55	63,38	256,40	319,78	284,47
2		1,08	2,307	103,85	63,38	256,40	319,78	284,47
3		0,96	3,447	120,39	63,38	256,40	319,78	284,47
4	1,99	1,28	2,538	60,40	63,38	256,40	319,78	284,47
5		1,18	2,452	71,81	63,38	256,40	319,78	284,47
6		1,08	2,587	85,03	63,38	256,40	319,78	284,47
7	1,63	1,21	3,020	44,23	63,38	256,40	319,78	284,47
8		1,13	3,807	54,95	63,38	256,40	319,78	284,47
9		1,04	3,670	67,19	63,38	256,40	319,78	284,47

O volume de pasta resultante foi de 39,33% e a relação entre o volume de agregado graúdo e o volume total de agregados foi de 46,97%.

Confrontando-se estes resultados com a faixa apresentada na Tabela 2, do item 3.2, definida na literatura, observa-se que:

- o consumo de cimento foi inferior ao máximo estabelecido em 450 kg;
- a relação água/finos excedeu o limite, especificado em 1,20 apenas nas misturas 4 e 7;
- o consumo de agregado miúdo é baixo e está dentro da faixa apresentada que vai de 710 a 900 kg/m<sup>3</sup>;
- o consumo de agregado graúdo também é reduzido, abaixo de 340 L/m<sup>3</sup>, e bem próximo ao limite inferior definido em massa, que é de 750 kg/m<sup>3</sup>, sendo admitido o máximo de 920 kg/m<sup>3</sup>.

Isto demonstra que o procedimento adotado para a dosagem do CAA, permitiu a obtenção de concretos com consumo de materiais dentro do que se considera ideal para garantir auto-compactabilidade e economia.

A partir destes resultados, foram traçadas curvas representando a distribuição granulométrica de todos os sólidos do concreto. Na Figura 64 apresenta-se um exemplo, representando o concreto de número 2, produzido com os dois tipos de fíler.

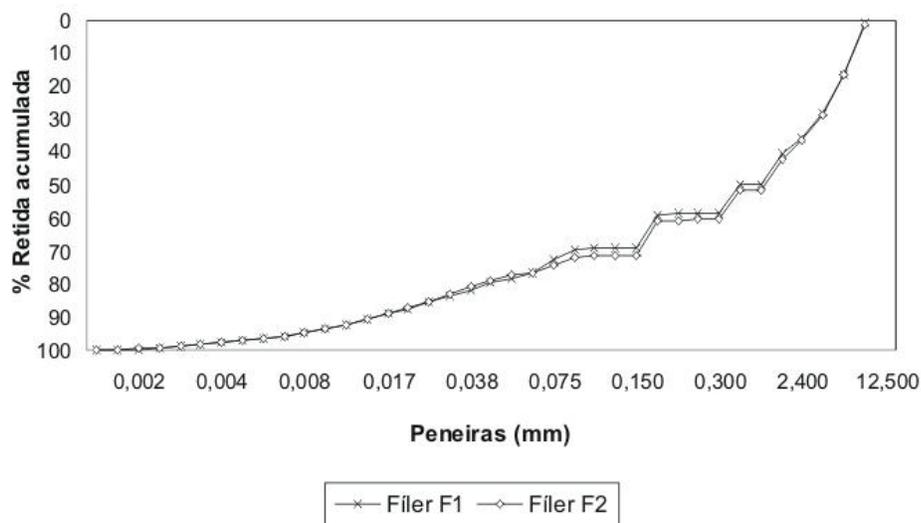


Figura 64 – Curvas granulométricas dos sólidos no concreto 2

As curvas são bastante semelhantes, sendo este comportamento observado em todas as misturas. Com isto, conclui-se que a correção da areia em função da fração mais grossa do fíler F1 foi eficiente, uma vez que não se nota diferença expressiva em relação aos tipos de fíler.

### 6.6.2 Análise de custos

Analisando-se o custo dos concretos produzidos com fíler F2, em relação ao consumo de cimento e aditivo superplastificante, foram obtidos os valores apresentados na Tabela 39, que são comparados com os valores de  $R_m/G_m^{0,4}$  apresentados no item 6.3.2.

Tabela 39. – Custo do cimento e aditivo empregados nos concretos e relação entre os ensaios de espalhamento e fluidez das argamassas

Mistura	Custo (R\$)	$R_m/G_m^{0,4}$
1	127,43	1,22
2	123,40	0,728
3	129,12	-
4	157,80	1,208
5	152,43	1,09
6	148,57	0,714
7	187,79	1,08
8	190,85	0,714
9	184,00	0,61

As regiões sombreadas indicam que as misturas mais econômicas são aquelas que apresentaram melhores resultados em relação ao parâmetro apresentado pelo Método de Okamura. Isto demonstra que a relação entre os ensaios de espalhamento e fluidez das argamassas é eficiente para definir o teor ideal de fíler da mistura. Isto pode ser demonstrado pela argamassa de número 3, que não se enquadrou dentro dos requisitos de auto-compactabilidade, o que indica que o teor de fíler empregado na argamassa 2 deve representar o máximo admissível para a quantidade de água empregada.

Os valores apresentados para o custo do concreto consideram o preço do cimento em R\$ 20,00 por saco de 50 kg e do aditivo em R\$ 10,00 por litro. Nesta análise não foi incluído o custo do fíler porque seu valor comercial é variável, além de que é possível utilizar diferentes tipos de adições inertes para a produção do CAA seguindo o procedimento apresentado neste trabalho.

### 6.6.3 Curvas para definição dos parâmetros de dosagem

Definidos os consumos dos constituintes do concreto, foram elaboradas curvas para auxiliar a dosagem do CAA, sem que seja necessário proceder a uma definição experimental. Com os dados de resistência à compressão e relação água/cimento aplicou-se uma análise por regressão linear ajustando-os à Lei de Abrams, cujos resultados encontram-se na Tabela 40.

Tabela 40. – Leis de Abrams para CAA empregando fíler calcário

Idade	Fíler F1	Fíler F2
7 dias	$f_{cj} = \frac{76,35}{4,5^{a/c}}$	$f_{cj} = \frac{148,31}{12,21^{a/c}}$
28 dias	$f_{cj} = \frac{132,82}{7,3^{a/c}}$	$f_{cj} = \frac{125,28}{7,16^{a/c}}$

As Figuras 65 e 66 apresentam estas relações para o fíler F1 e fíler F2, respectivamente.

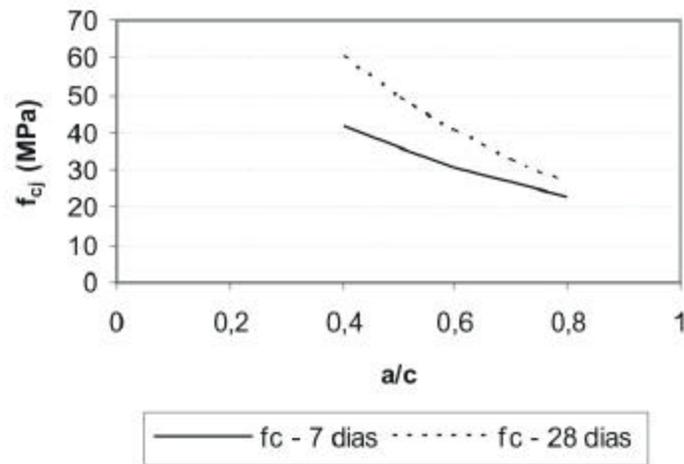


Figura 65 – Curvas de Abrams para a resistência à compressão dos concretos com fíler F1

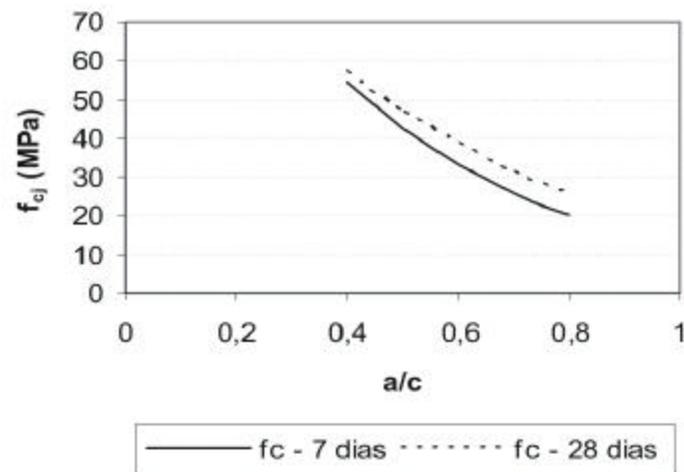


Figura 66 – Curvas de Abrams para a resistência à compressão dos concretos com fíler F2

Para auxiliar no processo de dosagem, foram elaboradas curvas que permitem a determinação do teor de cimento e fíler, após a definição da relação água/cimento feita acima. A Figura 67 representa a relação água/cimento em função do consumo de fíler, o qual é relacionado ao consumo de cimento, conforme apresentado na Figura 68.

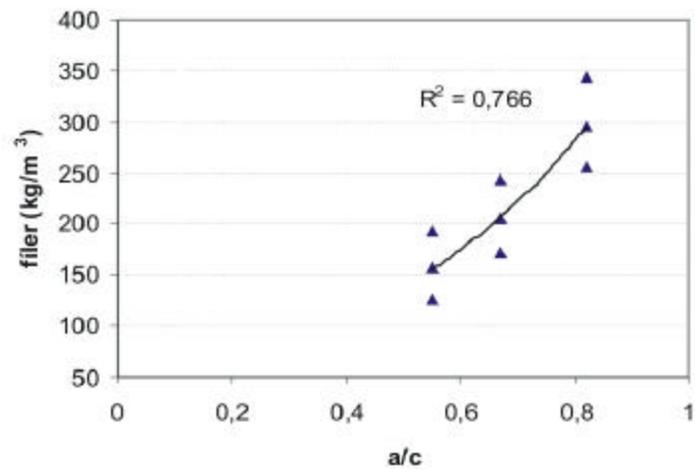


Figura 67 – Relação entre água/cimento e consumo de fíler

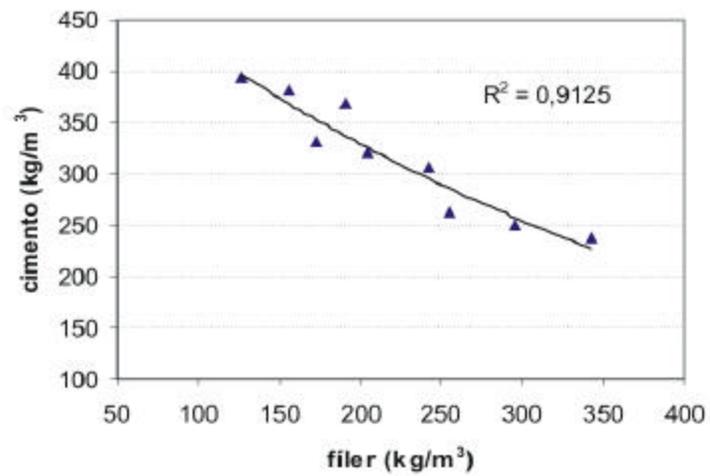


Figura 68 – Relação entre consumo de fíler e consumo de cimento

## **7 PROPOSIÇÃO DE UM MÉTODO OTIMIZADO DE DOSAGEM PARA CAA**

Com base na análise dos resultados apresentados nesta dissertação, bem como na avaliação dos trabalhos publicados sobre o tema em estudo, propõe-se a seguir um método de dosagem de CAA composto com cimento portland e com incorporação de fíler mormente de base calcárea. Este método foi desenvolvido em trabalho conjunto do Prof. Wellington L. Repette e esta autora, sendo aqui chamado de Método REPETTE-MELO. A seguir, apresenta-se a primeira versão do Método, descrevendo-se os parâmetros definidos e as formas para sua definição.

### **7.1 Descrição geral**

O método baseia-se no estabelecimento de composições de CAA para resistências à compressão requeridas, sendo que a relação água/cimento é determinada por meio das relações água/cimento – resistência conhecidas para o cimento utilizado na mistura. A relação fíler/cimento é determinada, inicialmente, em misturas de pasta produzidas com a relação água/cimento anteriormente definida, de forma que não haja indícios de segregação ou exsudação nestas misturas.

Determina-se a relação volumétrica agregado miúdo/argamassa, através de medidas de espalhamento e fluidez nas argamassas, variando-se, para isto, o teor de aditivo. Definido o teor de agregado miúdo, o teor de fíler nas argamassas é aumentado em relação ao valor inicial definido na pasta e, a partir da incorporação de aditivo, determina-se a quantidade de fíler ideal para cada relação água/cimento, avaliando-se a economia e a auto-compactabilidade das misturas.

O volume de agregado graúdo é determinado em relação ao volume total de concreto, de forma a se obter misturas adequadas em função dos ensaios de espalhamento, fluidez e Caixa-L, além de se verificar sua estabilidade e a distribuição dos agregados. Com estes mesmos ensaios, faz-se o ajuste final do teor de aditivo no concreto.

Na Figura 69 tem-se a representação esquemática do método proposto.

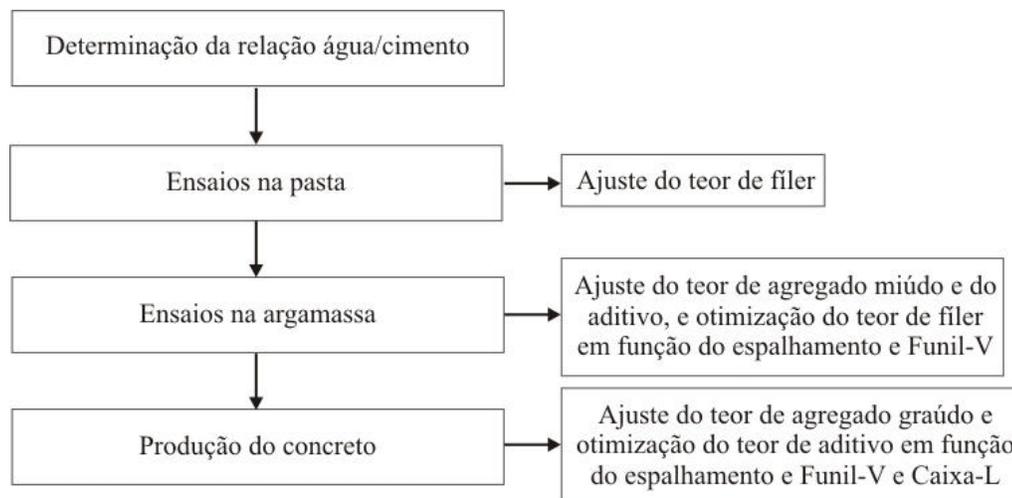


Figura 69 – Fluxograma do método de dosagem proposto

## 7.2 Definição dos parâmetros de dosagem

Deve-se destacar que o procedimento descrito a seguir objetiva a definição de uma família de concretos auto-adensáveis com resistências à compressão entre 20 e 45 MPa. Para a definição das proporções nesta faixa de resistência, propõe-se definir no mínimo três resistências no intervalo de interesse, sendo dois valores extremos e um intermediário, preferencialmente, correspondente à média aritmética dos extremos.

Na definição da relação água/cimento, deve-se atentar para o valor mínimo necessário para que sejam atendidos os requisitos de durabilidade, em função das condições de exposição da estrutura. Além disso o teor de cimento também deve ser controlado em função do teor mínimo exigido, que no CAA é de 200 kg, conforme indicado por Gomes (2002).

### 7.2.1 Composição da pasta

Nesta etapa são definidos a relação água/cimento e o volume de adição na pasta.

#### 7.2.1.1 Relação água/cimento

A relação água/cimento é obtida, como primeiro parâmetro de dosagem, em função da resistência à compressão desejada, utilizando-se, para isto, curvas de resistência em função da água/cimento, definidas para o tipo de cimento empregado. Desta forma, a resistência não será uma consequência dos demais parâmetros, mas servirá de ponto de partida para que se obtenham misturas com volumes adequados dos materiais. No método de Okamura, a resistência à compressão não é considerada nas etapas de dosagem, sendo normalmente

bastante elevada em função das baixas relações água/cimento adotadas, resultando em misturas com teor de pasta excessivo e maior custo.

Como premissa básica, no método proposto, considerou-se que a incorporação de fíler nos teores determinados em conformidade com o que se descreve no item 7.2.1.2, não interfere significativamente no desenvolvimento da resistência à compressão da pasta preparada com cimento e água, sendo então função da relação água/cimento. Preferencialmente, a relação água/cimento deve ser adotada a partir de relações com a resistência estabelecidas para concretos, mesmo que convencionais, produzidos com o cimento e materiais utilizados na mistura. Na definição da família de concretos, deve-se determinar um valor de água/cimento para cada resistência especificada (deve-se adotar no mínimo três valores de resistência para a definição da família de composições).

#### 7.2.1.2 Teor de finos

O teor de finos deve ser determinado para cada relação água/cimento especificada. Desde que a pasta mostre-se instável, ou seja a mistura apresente excesso de água, emprega-se fíler para corrigir esta instabilidade. A incorporação pode ser feita em intervalos de 5% em volume. Ressalta-se que, nesta etapa, somente a porção fina de fíler, ou seja, aquela que passa pela peneira de malha 0,075mm, é incorporada à pasta. A incorporação deve ser feita até que não seja observada a ocorrência de segregação dos constituintes, obtendo-se o teor ideal de finos para promover a adequada retenção de água. Cabe salientar que o teor de fíler aqui definido poderá, posteriormente, sofrer ajuste para que o efeito do aditivo superplastificante seja corrigido, o que se verificará em ensaios realizados em argamassa, conforme detalha-se no item 7.2.2.2. Idealmente, a fração fina do fíler calcário (partículas <0,075mm) deverá ter distribuição granulométrica similar ou com uma curva de menor inclinação, o que indica melhor distribuição das dimensões, se comparada à do cimento empregado.

#### 7.2.2 Composição da argamassa

Nesta fase da dosagem, define-se o teor de agregado miúdo em relação ao volume total de argamassa, faz-se um ajuste do teor de adição de fíler, e determina-se o teor base de aditivo superplastificante que será, por meio de experimento, ratificado ou corrigido no concreto.

### 7.2.2.1 Teor de agregado miúdo

Conforme os resultados obtidos, o teor de agregado miúdo deve ser ajustado para uma única relação água/cimento (a intermediária, no caso da construção da curva da família de concreto com três resistências), sendo o valor encontrado adotado para as demais misturas (com teores extremos de água/cimento).

Para se definir o teor ideal de agregado miúdo, ensaiam-se argamassas com diferentes teores de agregado miúdo e de aditivo superplastificante. Nesta fase, somente argamassas com o teor intermediário de água necessitam ser ensaiadas, uma vez que o mesmo volume de agregado pode ser empregado para as demais relações água/cimento.

O volume de agregado miúdo em relação ao volume total de argamassa deve ser, preferencialmente, não inferior a 35% e não superior a 55%. Valores entre 40 e 50% são mais prováveis de levarem a argamassas adequadas. Partindo-se do valor inferior adotado, incrementos de 5% no teor de agregado miúdo são geralmente suficientes para a obtenção do teor adequado, podendo-se empregar incrementos de 2,5% ou menores quando se desejar um ajuste mais fino da mistura. As argamassas são avaliadas em função dos ensaios de espalhamento e Funil-V, incorporando-se aditivo superplastificante em intervalos de 0,05% ou menores, partindo-se do teor de 0,1% (massa de sólidos do aditivo em relação à massa de cimento).

Deve-se determinar o teor de aditivo para que se obtenha diâmetro de espalhamento da argamassa entre 200 e 280 mm e tempo de escoamento no Funil-V que deve estar entre 3,5 e 10 segundos. É importante que no ensaio do Funil-V sejam descartadas as misturas que apresentarem tendência de segregação. Para um determinado teor de agregado miúdo, o teor de aditivo não necessita ser incrementado além do valor para o qual os limites de espalhamento e tempo de escoamento já tenham sido alcançados. Desta forma, se está estabelecendo sempre o teor mínimo de aditivo para aquele determinado teor de agregado miúdo.

O volume ideal de agregado miúdo é selecionado dentre as misturas que contêm o maior teor deste material. Este parâmetro permanece fixo para as argamassas com outras relações água/cimento, e para o concreto. Na Tabela 41 tem-se um exemplo de escolha do teor ideal de aditivo e, função dos resultados dos ensaios.

Tabela 41. – Exemplo de resultados dos ensaios para escolha do teor de agregado miúdo

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

Neste caso, o teor ideal de agregado miúdo é de 45% em relação ao volume total de argamassa, sendo atingido resultado satisfatório dos ensaios quando o teor de aditivo foi de 0,20%, não havendo necessidade de se incorporar mais aditivo a partir deste ponto.

É importante ressaltar que a porção da parte da grossa do fíler (partículas >0,075mm), caso exista, é considerada como parte do agregado miúdo.

#### 7.2.2.2 Ajuste final do teor de adição

Os resultados obtidos neste trabalho demonstraram que, devido ao uso de aditivo superplastificante, a quantidade de adição definida na pasta pode ser aumentada, para que sejam obtidas misturas mais econômicas. Desta forma, após a definição da quantidade de agregado miúdo, o teor de fíler deve ser aumentado em relação ao que foi definido inicialmente na pasta, podendo ser adotado um aumento de 5%, que demonstrou-se satisfatório de acordo com os resultados obtidos deste trabalho. Isto permite a investigação do volume máximo de fíler que pode ser empregado para se obter um teor de aditivo que leve à produção de misturas com características em conformidade com as especificações de ensaio.

O ajuste do teor de adição deve ser feito a partir da incorporação de aditivo, podendo-se partir do teor definido na etapa de ajuste do agregado miúdo. Este teor deve ser variado em incrementos de 0,05%, ou menores, caso se deseje maior refinamento dos resultados. As argamassas são avaliadas novamente por meio dos ensaios de espalhamento e fluidez porém, com novas faixas de aceitação, definidas a partir da relação proposta no Método de Okamura, apresentada nas Equação 11 do item 3.2.1, tendo em vista que esta análise confirmou a definição das misturas mais econômicas. Aplicando-se esta equação em conjunto com a

análise dos dados obtidos neste trabalho, pode-se chegar a uma faixa de valores para a relação entre o espalhamento relativo (Gm) e o tempo de fluidez relativo (Rm), que foi de 0,46 a 0,66. Estes valores representam que o intervalo de aceitação para o diâmetro de espalhamento deve ser de 250 a 280 mm, e o tempo de escoamento no Funil-V de 5 a 10 segundos.

Desta forma, tem-se a otimização da fase de argamassa, sendo os valores encontrados adotados na produção do concreto, exceto o teor de aditivos, que poderá necessitar de novo ajuste.

### **7.2.3 Composição do concreto**

O proporcionamento final dos componentes, lembrando-se que restam para serem definidos o teor de agregados graúdo e o de aditivo superplastificante, é obtido com ensaios em concreto, determinando-se as propriedades de capacidade de preenchimento, resistência ao bloqueio e resistência à segregação.

#### **7.2.3.1 Teor de agregado graúdo**

Empregando-se a argamassa com teor intermediário de água/cimento definida no item 7.2.2.2, preparam-se concretos com diferentes teores de agregado graúdo, propondo-se valores que podem ser de 27, 28,5, 30, 31,5 e 33% em relação ao volume total de concreto. Para o teor mínimo adotado, devem ser realizados os ensaios de espalhamento, Funil-V e Caixa-L, ajustando-se o teor de aditivo para que se atinjam os requisitos exigidos. Em seguida, o teor de agregado graúdo deve ser aumentado de acordo com o intervalo definido, realizando-se novamente os ensaios apresentados. O teor de aditivo deve ser ajustado sempre que houver perda das propriedades de auto-compactabilidade decorrentes da incorporação de agregado. O teor ideal de agregado graúdo é o máximo possível para que sejam atendidos os requisitos de ensaio, empregando-se um teor de aditivo preferencialmente menor que 0,3%. A escolha deve se dar também a partir da análise da uniformidade na distribuição das partículas do agregado, devendo-se, para isto, observar a existência de um excesso de pasta no espalhamento; e da ocorrência de bloqueio, verificado pela Caixa-L e de segregação, verificada no funil.

Na Tabela 42 tem-se os intervalos de aceitação dos ensaios empregados na análise do concreto.

Tabela 42. – Limites de aceitação do CAA de acordo com o método de ensaio

Método de ensaio	Valores aceitáveis para o CAA
Espalhamento (d)	600 a 700 mm
Funil-V (t)	< 10 s
Caixa-L (H <sub>2</sub> /H <sub>1</sub> )	≥ 0,8

Deve-se verificar também a granulometria do agregado graúdo. Podem ser utilizadas composições entre dois tipos de agregados, sendo a dimensão máxima definida em função das restrições e espaçamentos entre armaduras e tamanho dos elementos estruturais. Em geral, no CAA emprega-se agregado graúdo com dimensão inferior ao que é utilizado em concreto convencional. Conforme os resultados obtidos, sugere-se limitar a dimensão máxima em 10 mm.

#### 7.2.3.2 Ajuste final do aditivo

Após a definição de todos os parâmetros de dosagem, deve-se proceder ao ajuste final do aditivo para que o concreto obtido seja enquadrado como auto-adensável.

Para isto, deve-se variar o teor de aditivo, realizando-se os ensaios de espalhamento, Funil-V e Caixa-L, seguindo os mesmos critérios definidos no item anterior. O teor de aditivo obtido na argamassa dá um indicativo do resultado que será obtido no concreto, devendo ser necessário um acréscimo de aproximadamente 0,1%. O teor inicial de aditivo para ajuste do concreto pode ser aquele definido na argamassa, acrescido de 0,05%. Os intervalos de adição podem ser de 0,025%, que se demonstrou satisfatório para um bom ajuste do concreto.

Durante a produção dos concretos, é importante atentar para a ocorrência de perda de fluidez, que deve ser acompanhada por meio dos ensaios definidos para a avaliação das propriedades do concreto no estado fresco. O limite de aceitação da perda de fluidez depende do tipo de aplicação do concreto, e pode variar em função das condições de produção ou propriedades dos materiais constituintes, destacando-se, neste ponto, a eficiência do aditivo superplastificante.

### 7.3 Avaliação das propriedades mecânicas

A resistência à compressão deve ser avaliada inicialmente nas argamassas, para que se possa verificar se a relação água/cimento definida foi adequada para a obtenção da resistência desejada. Isto permite detectar algum erro de dosagem, podendo ser corrigido antes de se passar para a produção do concreto. Para isto moldam-se 6 corpos-de-prova, sendo três

ensaiados aos 7 dias e 3 aos 28 dias. A resistência à compressão obtida aos 7 dias já dá um indicativo da coerência dos resultados.

Para acompanhar as propriedades mecânicas do concreto, devem ser moldados 3 corpos-de-prova para cada idade de ensaio desejada na determinação da resistência à compressão, e dois corpos-de-prova para a análise do módulo de elasticidade aos 28 dias, ou em outra idade desejada.

## 8 CONCLUSÕES

Os parágrafos seguintes apresentam as principais observações extraídas ao longo do trabalho, em função dos resultados obtidos em cada etapa do estudo.

Pode-se observar que os materiais empregados foram satisfatórios para a confecção de CAA. A escolha adequada destes materiais representa um ponto importante na dosagem do CAA, tendo em vista que suas características, especialmente em relação a granulometria, atuam diretamente na deformabilidade do concreto, bem como na sua estabilidade.

O teor de filer é variável em função da relação água/cimento, sendo maior com o aumento do teor de água na mistura. Isto ocorre para que seja garantida a viscosidade adequada da mistura, de forma que não haja instabilidade no estado fresco. Pode-se observar que os teores definidos em função da segregação da pasta foram satisfatórios para a continuidade do estudo, porém, deve ser feito um ajuste final nas argamassas para se obter o teor máximo que pode ser empregado em função do uso de aditivo superplastificante.

Com relação à determinação do teor de aditivo nas pastas, não foi possível obter uma relação clara entre o ensaio do Cone de Marsh e os parâmetros reológicos da pasta, obtidos no viscosímetro. Este resultado pode ter sido decorrente da diferença na energia de mistura, que pode ter gerado condições diferentes de avaliação, nos dois métodos de ensaio. Além disso, o acréscimo de aditivo nas argamassas, a partir do teor definido nas pastas, não foi uniforme para todas as misturas. Isto demonstrou a necessidade de se proceder ao ajuste do aditivo nas fases de argamassa e concreto.

Observou-se que o ensaio de espalhamento, ou *Slump flow*, foi mais confiável do que o Funil-V na escolha da argamassa com melhor característica de auto-compactabilidade, servindo para o ajuste do teor de agregado miúdo de forma satisfatória. O volume definido em 45% de agregado miúdo em relação ao volume total de argamassa, apresentou-se próximo do que se tem empregado no CAA, que é normalmente 40%, além de ficar dentro do intervalo definido como aceitável na literatura que vai de 40 a 50%.

A metodologia de filmagem adotada no ensaio do Funil-V representa um avanço importante na avaliação deste ensaio, pois permite minimizar os erros decorrentes da dificuldade de se determinar o tempo por meio de um cronômetro, fazendo com que o resultado seja menos dependente do operador. Este ensaio não foi muito sensível às variações das argamassas, mas identificou bem as misturas com alta viscosidade.

Os métodos de ensaio utilizados tiveram o comportamento esperado em relação à avaliação das propriedades do concreto. As relações entre os resultados obtidos em argamassa e concreto não foram completamente satisfatórias, especialmente quanto ao espalhamento, porém isto pode ter sido decorrente da diferença no teor de aditivos e da constituição destas fases, tendo em vista a presença do agregado graúdo no concreto.

A definição da dimensão e do teor ideal de agregado graúdo foi bastante laboriosa, mas constituiu-se num aspecto importante na dosagem do CAA. O uso de brita 0 levou à obtenção das propriedades desejadas, mas observou-se que há necessidade de melhor adequação da sua curva granulométrica às faixas definidas, com a inclusão de partículas mais grossas. O teor obtido em 28,5% de brita 0 está próximo do que se tem empregado em diversas misturas de CAA apresentadas na literatura em 30%.

No caso da resistência à compressão, os resultados estiveram dentro do esperado, tanto nas argamassas como no concreto, já que este foi um parâmetro determinante para a dosagem. Isto indica que o filer realmente não alterou significativamente o desenvolvimento da resistência à compressão, podendo ter contribuído para o seu aumento nas primeiras idades, devido ao favorecimento provocado sobre a hidratação inicial do cimento.

O módulo de elasticidade dos concretos também apresentou resultados satisfatórios, mas não se tem ainda muita informação deste parâmetro no CAA, de forma que não se podem obter grandes conclusões. Neste sentido, há necessidade de um estudo intensivo para adaptar as relações atualmente definidas para os concretos convencionais, que permita a previsão do módulo de elasticidade no CAA, levando em consideração as particularidades deste concreto.

Um ponto importante observado nos concretos corresponde à rápida perda de fluidez com o tempo, que pode indicar a não adequação do aditivo superplastificante de base policarboxilatos em relação às condições de produção dos concretos, principalmente no que diz respeito às temperaturas sob as quais estavam submetidos. Outro fator relacionado à perda de fluidez diz respeito à compatibilidade do aditivo com os demais materiais, especialmente o cimento e o filer, o que exige novos estudos que permitam identificar este efeito.

As curvas apresentadas para auxiliar na dosagem dos concretos são bastante úteis e podem ser aplicadas para o CAA produzido com materiais semelhantes aos empregados. Isto facilita a dosagem deste concreto, que ainda é complexa, e auxilia na difusão do seu emprego em obras usuais.

O método de dosagem proposto permite que seja obtido CAA em que a resistência à compressão é o ponto de partida para a definição dos demais parâmetros de dosagem, quando são empregadas adições inertes ou que exerçam pouca influência na resistência à compressão, como é o caso do fíler calcário. Isto leva à produção de CAA com resistências normais, sem que sejam obtidas, necessariamente, altas resistências, em detrimento à economia.

### **8.1 Sugestões para trabalhos futuros**

Os parágrafos seguintes apresentam alguns aspectos relevantes para a continuidade do trabalho apresentado.

Um primeiro ponto que pode ser investigado diz respeito aos ensaios de reologia da pasta. Este tipo de avaliação permite a obtenção de resultados bastante precisos, pois não há dependência da forma de medição ou do operador. Isto constitui um fator importante para o CAA, e precisa ser melhor estudado para que sejam obtidas relações claras entre os parâmetros reológicos da pasta e os resultados dos métodos de ensaio empíricos para avaliação da auto-compactabilidade de argamassas e concretos.

Estudos relacionados à determinação da retenção de água e da forma das partículas da adição podem levar ao melhor entendimento do comportamento do CAA, observando-se a influência destas características na obtenção das propriedades exigidas para as misturas. Da mesma maneira, a forma dos grãos do agregado miúdo também é um fator importante que precisa ser investigado. A escolha e o proporcionamento ideal dos materiais constituintes do concreto podem ser melhorados quando se conhecem suas principais características, permitindo-se chegar a misturas otimizadas e mais econômicas.

Uma forma de padronizar os resultados dos ensaios obtidos em concretos e argamassas, estreitando a relação entre métodos de avaliação equivalentes, é a definição do tempo ideal de mistura nestas duas fases. Este fator exerce bastante influência no efeito de dispersão das partículas promovido pelo aditivo, que constitui um aspecto importante no CAA, especialmente no que diz respeito à sua deformabilidade.

Um avanço na racionalidade do processo de dosagem está na definição do volume mínimo de pasta necessário para envolver os grãos e permitir a deformabilidade ideal do concreto. Estudos neste sentido devem ser realizados em função do tipo de agregado e das condições de resistência ao bloqueio, requeridas conforme a aplicação do concreto.

Recomendam-se estudos para avaliar a durabilidade dos concretos, especialmente quando produzidos com o tipo de adição empregada neste trabalho, devido ao alto teor de magnésio na sua composição.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AARRE, T.; DOMONE, P. Reference concretes for evaluation of test methods for SCC. Edição: O. Wallevik; I. Nielsson. In: INTERNATIONAL RILEM SYMPOSIUM ON SELF-COMPACTING CONCRETE, 3rd., 2003, Reykjavik. **Proceedings...** France: RILEM Publications, 2003. p. 495-505.

AHMAD, I.; AZHAR, S. Temperature variation in high slump drilled shaft concrete and its effect on slump loss. **Cement and Concrete Research**, v. 34, n. 2, p. 207-217, Feb. 2003.

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

AÏ TCIN, P. C.; JOLICOEUR, C.; MACGREGOR, J. Superplasticizers: how they work and why they occasionally don't. **Concrete International**, v. 16, n. 5, p. 45-52, May 1994.

AMERICAN CONCRETE INSTITUTE. **ACI 212.3R**: Chemical admixtures for concrete. Michigan: ACI Committee, 1996.

\_\_\_\_\_. **ACI 212.4R**: Guide for use of high-range water-reducing admixtures (superplasticizers) in concrete. Michigan: ACI Committee, 1996.

\_\_\_\_\_. **ACI 233R**: Ground granulated blast-furnace slag as a cementitious constituent in concrete. Michigan: ACI Committee, 1996.

ASSAAD, J.; KHAYAT, K. H.; MESBAH, H. Assessment of thixotropy of flowable and self-consolidating concrete. **ACI Materials Journal**, v. 100, n. 2, p. 99-107, Mar./April 2003.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM C 232**: Standard test methods for bleeding of concrete. Philadelphia: ASTM, 2004.

\_\_\_\_\_. **ASTM C 618**: Standard specification for coal fly ash and raw or calcined natural pozzolan for use in concrete. Philadelphia: ASTM, 2003.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6118**: Projeto de estruturas de concreto – procedimento. Rio de Janeiro: ABNT, 2004.

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

\_\_\_\_\_. **NBR 7809**: Agregado graúdo – Determinação do índice de forma pelo método do paquímetro. Rio de Janeiro: ABNT, 1983.

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

\_\_\_\_\_. **NBR 8522:** Concreto – Determinação dos módulos estáticos e de elasticidade e de deformação e da curva tensão-deformação. Rio de Janeiro: ABNT, 2003.

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

\_\_\_\_\_. **NBR 9776:** Agregado miúdo – Determinação de massa específica e massa específica aparente. Rio de Janeiro: ABNT, 1987.

\_\_\_\_\_. **NBR 9937:** Agregado graúdo – Determinação de massa específica e massa específica aparente. Rio de Janeiro: ABNT, 1987.

\_\_\_\_\_. **NBRNM 30:** Agregado miúdo – Determinação da absorção de água. Rio de Janeiro: ABNT, 2001.

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

\_\_\_\_\_. **NBRNM 76:** Cimento Portland – Determinação da finura pelo método de permeabilidade do ar (Método de Blaine). Rio de Janeiro: ABNT, 1998.

\_\_\_\_\_. **NBRNM 248:** Agregados - Determinação da composição granulométrica. Rio de Janeiro: ABNT, 2001.

BANFILL, P. F. G. Rheological methods for assessing the flow properties of mortar and related materials. **Construction and Building Materials**, v. 8, n. 1, p. 43-49, 1994.

BANFILL, P. F. G. The rheology of fresh cement and concrete – a review. In: INTERNATIONAL CEMENT CHEMISTRY CONGRESS, 11st., 2003, Durban. **Proceedings...** France: RILEM Publications, 2003. p. 533-539.

BOSILJKOV, V. B. SCC mixes with poorly graded aggregate and high volume of limestone filler. **Cement and Concrete Research**, v. 33, n. 9, p. 1279-1286, Sept. 2003.

BRAMESHUBER, W. Three years of approvals for SCC – a report form the field. **Concrete Precasting Plant and Technology**, v. 70, n.2, p. 78-79, 2004.

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

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

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

CORDOVIL, F. A. B.; ASSUNÇÃO, J. W. Efeito dos poros na elasticidade do concreto. In: Encontro Tecnológico de Engenharia Civil e Arquitetura de Maringá - ENTECA, 1., 2000, Maringá. **Anais...** Maringá: UEM, 2000.

DANA, J. D. **Manual of mineralogy**. Revisão: C. Klein; C. S. Hurlbut Jr. 21st ed. New York: John Wiley & Sons, 1993. 681 p.

DE LARRARD, F. Concrete Mixture Proportioning – A scientific approach. E&FN Spon, London, 1999. p.420.

DOLOMITA DO BRASIL. Cultura. Disponível em: <[http:// www.dolomita.com.br/cultura](http://www.dolomita.com.br/cultura)>. Acesso em: 08 fev. 2005.

DOMONE, P. L. J.; JIN, J. Properties of mortar for self-compacting concrete. Edição: A. Skarendahl; O. Petersson. In: INTERNATIONAL RILEM SYMPOSIUM ON SELF-COMPACTING CONCRETE, 1st., 1999, Stockholm. **Proceedings...** France: RILEM Publications, 1999. p. 109-120.

EDAMATSU, Y.; SUGAMATA, T.; OUCHI, M. A mix-design method for self-compacting concrete based on mortar flow and funnel tests. Edição: O. Wallevik; I. Nielsson. In: INTERNATIONAL RILEM SYMPOSIUM ON SELF-COMPACTING CONCRETE, 3rd., 2003, Reykjavik. **Proceedings...** France: RILEM Publications, 2003. p. 345-355.

EFNARC. Specifications and Guidelines for Self-Compacting Concrete. Reino Unido, 2002. 32 p.

EMBORG, M. Rheology tests for self-compacting concrete – How useful are they for the design of concrete mix for full-scale production? Edição: A. Skarendahl; O. Petersson. In: INTERNATIONAL RILEM SYMPOSIUM ON SELF-COMPACTING CONCRETE, 1st., 1999, Stockholm. **Proceedings...** France: RILEM Publications, 1999. p. 95-105.

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

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

GIBBS, J. Self-compacting concrete – getting it right. **Concrete (London)**, v. 38, n.6, p. 10-13, June 2004.

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

HEIRMAN, G.; VANDEWALLE, L. The influence of fillers on the properties of self-compacting concrete in fresh and hardened states. Edição: O. Wallevik; I. Nielsson. In: INTERNATIONAL RILEM SYMPOSIUM ON SELF-COMPACTING CONCRETE, 3rd., 2003, Reykjavik. **Proceedings...** France: RILEM Publications, 2003. p. 606-618.

HELENE, P.; TERZIAN, P. **Manual de dosagem e controle do concreto**. 1. ed. São Paulo: PINI; Brasília: SENAI, 1993. 349 p.

HO, D. W. S.; SHEINN, A. M. M.; TAM, C. T. The sandwich concept of construction with SCC. **Cement and Concrete Research**, v. 31, n.10, p. 1377-1381, Oct. 2001.

HODGSON, T. **Laboratory and field investigations of self-consolidating concrete**. 2003. 91 f. MS Thesis - Department of Civil Engineering, Auburn University, Alabama, 2003.

HWANG, S.-D. et al. Performance of self-consolidating concrete made with various admixture combinations. Edição: O. Wallevik; I. Nielsson. In: INTERNATIONAL RILEM SYMPOSIUM ON SELF-COMPACTING CONCRETE, 3rd., 2003, Reykjavik. **Proceedings...** France: RILEM Publications, 2003. p. 467-478.

JARAMILLO, C. A. A. et al. Reduced models test for the characterization of the reologic properties of self-compacting concrete (SCC). Edição: O. Wallevik; I. Nielsson. In: INTERNATIONAL RILEM SYMPOSIUM ON SELF-COMPACTING CONCRETE, 3rd., 2003, Reykjavik. **Proceedings...** France: RILEM Publications, 2003. p. 240-250.

JUVAS, K. Self-compacting concrete – developments in the precast industry. **Concrete Precasting Plant and Technology**, v. 70, n.8, p. 48-52, 2004.

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

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.

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

MALHOTRA, V. M. Supplementary cementing materials for concrete. Ottawa: CANMET, 1987. 428 p.

MALHOTRA, V. M.; MEHTA, P. K. **Pozzolanic and cementitious materials**. Ottawa: CANMET, 1996. 191 p. (Advances in concrete technology, v. 1).

MARQUARDT, I.; VALA, J.; DIEDERICHS, U. Determination of the composition of self-compacting concretes on the basis of the water requirements of the constituent materials. **Concrete Precasting Plant and Technology**, v. 68, n.11, p. 22-30, 2002.

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

MELO, K. A. et al. Curvas de Abrams para concretos produzidos com os principais tipos de cimento e agregados empregados na região de Florianópolis. In: CONGRESSO BRASILEIRO DO CONCRETO - IBRACON, 46., 2004, Florianópolis. **Anais...** Florianópolis: IBRACON, 2004.

MOOSBERG-BUSTNES, H. Characterization of filler. Edição: O. Wallevik; I. Nielsson. In: INTERNATIONAL RILEM SYMPOSIUM ON SELF-COMPACTING CONCRETE, 3rd., 2003, Reykjavik. **Proceedings...** France: RILEM Publications, 2003. p. 540-550.

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

NIELSSON, I.; WALLEVIK, O. H. Rheological evaluation of some empirical test methods – Preliminary results. Edição: O. Wallevik; I. Nielsson. In: INTERNATIONAL RILEM SYMPOSIUM ON SELF-COMPACTING CONCRETE, 3rd., 2003, Reykjavik. **Proceedings...** France: RILEM Publications, 2003. p. 59-68.

NUNES, S. C. B. **Betão 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. Edição: A. Skarendahl; O. Petersson. In: INTERNATIONAL RILEM SYMPOSIUM ON SELF-COMPACTING CONCRETE, 1st., 1999, Stockholm. **Proceedings...** France: RILEM Publications, 1999. p. 3-14.

\_\_\_\_\_. Self-compacting concrete. **Journal of Advanced Concrete Technology**, v. 1, n. 1, p. 5-15, April 2003.

\_\_\_\_\_. Applications of self-compacting concrete in Japan. Edição: O. Wallevik; I. Nielsson. In: INTERNATIONAL RILEM SYMPOSIUM ON SELF-COMPACTING CONCRETE, 3rd., 2003, Reykjavik. **Proceedings...** France: RILEM Publications, 2003. p. 3-5.

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

PEDERSEN, B.; SMEPLASS, S. The relationship between the rheological properties of SCC and the corresponding matrix phase. Edição: O. Wallevik; I. Nielsson. In: INTERNATIONAL RILEM SYMPOSIUM ON SELF-COMPACTING CONCRETE, 3rd., 2003, Reykjavik. **Proceedings...** France: RILEM Publications, 2003. p. 106-116.

PETERSSON, O. **Workability.** SCC Final Report - Task 2. Brite EuRam: 1999. 56p.

POPPE, A.-M.; SCHUTTER, G. Effect of limestone filler on the cement hydration in self-compacting concrete. Edição: O. Wallevik; I. Nielsson. In: INTERNATIONAL RILEM SYMPOSIUM ON SELF-COMPACTING CONCRETE, 3rd., 2003, Reykjavik. **Proceedings...** France: RILEM Publications, 2003. p. 558-566.

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

ROLS, S.; AMBROISE, J.; PÉRA, J. Effects of different viscosity agents on the properties of self-leveling concrete. **Cement and Concrete Research**, v. 29, n. 2, p. 261-266, Feb. 1999.

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

RÜDIGER WERNER TECHNICAL SERVICES LABORATORY PAINTS & SURFACE COATINGS. Steep particle size distribution curves as a determining factor in the use of fine extenders in various coating systems. In: FSCT (Federation of Societies for coatings technology) ANNUAL MEETING, 1998, Los Angeles.

SAAK, A. W.; JENNINGS, H. M.; SHAH, S. New methodology for designing self-compacting concrete. **ACI Materials Journal**, v. 98, n. 6, p. 429-439, Nov./Dec. 2001.

SAAK, A. W.; JENNINGS, H. M.; SHAH, S. The influence of wall slip on yield stress and viscoelastic measurements of cement paste. **Cement and Concrete Research**, v. 31, n. 2, p. 205-212, Feb. 2001.

SHEINN, D.; HO, D. W. S.; TAM, C. T. Effect of particle shape on paste rheology of SCC. Edição: O. Wallevik; I. Nielsson. In: INTERNATIONAL RILEM SYMPOSIUM ON SELF-COMPACTING CONCRETE, 3rd., 2003, Reykjavik. **Proceedings...** France: RILEM Publications, 2003. p. 232-239.

SHINDOH, T.; MATSUOKA, Y. Development of Combination-Type Self-Compacting Concrete and Evaluation Test Methods. **Journal of Advanced Concrete Technology**. v. 1, n. 1, p. 26-36, Apr. 2003.

SHOYA, M. et al. Self-compactability of fresh concrete with non-ferrous metal slag fine aggregates. Edição: A. Skarendahl; O. Petersson. In: INTERNATIONAL RILEM SYMPOSIUM ON SELF-COMPACTING CONCRETE, 1st., 1999, Stockholm. **Proceedings...** France: RILEM Publications, 1999. p. 579-590.

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

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

STARK, J.; GATHEMANN, B. High-performance compound – optimized binder for self-compacting concrete. **Concrete Precasting Plant and Technology**, v. 70, n.2, p. 14-16, 2004.

SUGAMATA, T.; EDAMATSU, Y.; OUCHI, M. A study of particle dispersing retention effect of polycarboxylate-based superplasticizers. Edição: O. Wallevik; I. Nielsson. In: INTERNATIONAL RILEM SYMPOSIUM ON SELF-COMPACTING CONCRETE, 3rd., 2003, Reykjavik. **Proceedings...** France: RILEM Publications, 2003. p. 420-431.

TAKADA, K.; WALRAVEN, J. C. Evaluation for the effect of different types of superplasticizers considering the mixing effect. Edição: O. Wallevik; I. Nielsson. In: INTERNATIONAL RILEM SYMPOSIUM ON SELF-COMPACTING CONCRETE, 3rd., 2003, Reykjavik. **Proceedings...** France: RILEM Publications, 2003. p. 403-414.

TANAKA, L. et al. Fluidity of spherical cement and mechanism for creating high fluidity. **Cement and Concrete Research**. v. 28, n. 1, p. 63-74, Jan. 1998.

TAYLOR, H. F. W. **Cement Chemistry**. London: Academic Press, 1990.

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

WALLEVIK, O. H. Rheology – a scientific approach to develop self-compacting concrete. Edição: O. Wallevik; I. Nielsson. In: INTERNATIONAL RILEM SYMPOSIUM ON SELF-COMPACTING CONCRETE, 3rd., 2003, Reykjavik. **Proceedings...** France: RILEM Publications, 2003. p. 23-31.

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

XIE, Y. et al. Optimum mix parameters of high-strength self-compacting concrete with ultrapulverized fly ash. **Cement and Concrete Research**, v. 32, n. 3, p. 477-480, Mar. 2002.

YAMADA, K.; YANAGISAWA, T.; HANEHARA, S. Influence of temperature on the dispersibility of polycarboxylate type superplasticizer for highly fluid concrete. Edição: A. Skarendahl; O. Petersson. In: INTERNATIONAL RILEM SYMPOSIUM ON SELF-COMPACTING CONCRETE, 1st., 1999, Stockholm. **Proceedings...** France: RILEM Publications, 1999. p. 437-448.

YURUGI, M.; SAKAI, G. A proven QA system for flowable concrete. **Concrete International**, v. 20, n. 10, p. 44-48, Oct. 1998.

## APÊNDICE 1

### Resultados dos ensaios no Cone de Marsh – Filer F1

Mistura	Aditivo (%)	T5* (s)	T15** (s)	T30*** (s)
1	0,05	7,63	8,35	8,72
	0,1	6,14	6,53	7,63
	0,2	3	3	3
	0,4	4	4	3
	0,6	4	3	3
	0,8	3	3	3
2	0,05	12,63	14,34	17,06
	0,1	7,72	9	8,87
	0,2	6	6	6
	0,4	5	5	4
	0,6	4	4	4,5
	0,8	5	7	6
	1	4	5	3
3	0,1	15	15	17
	0,2	8	9	9
	0,4	6	8	7
	0,6	8	9	8
	0,8	7	8	-
4	0,05	8,19	9,06	9,85
	0,1	8,97	10,53	11,15
	0,2	4	4	4
	0,4	3	4	5
	0,6	3	3	4
	0,8	4	5	3
	1	4	4	4
5	0,05	9,47	11,25	12,78
	0,1	7,04	7,03	7,81
	0,2	5	5	6
	0,4	4	4	4
	0,6	4	6	5
	0,8	4	7	5
	1	5	4	6

Mistura	Aditivo (%)	T5* (s)	T15** (s)	T30*** (s)
6	0,05	12,19	15,87	19,62
	0,1	7	8	10
	0,2	6	6,75	6,59
	0,4	6	6,62	5,88
	0,6	5,63	5,84	5,16
	0,8	5,41	6,19	6,13
	1	6,58	7,31	6,84
7	0,05	11,18	11,97	14,3
	0,1	7,57	8,35	8,84
	0,2	6,69	6,28	6,66
	0,4	5,75	6,44	6,5
	0,6	5,72	5,69	5
	0,8	4,94	5,06	4,82
	1	5,66	5,89	7,66
8	0,05	11,09	10,44	12,44
	0,1	10,34	11,81	12,41
	0,2	7,49	8,6	9,3
	0,4	7	8	7
	0,6	5	6	6
	0,8	5	5	5
	1	5	6	5
9	0,05	16,37	20,31	25,9
	0,1	12,44	13,62	17,15
	0,2	8,99	10,1	11,02
	0,4	7,1	7,6	8,34
	0,6	7,13	8,35	8,51
	0,8	6,3	6,72	8,1
	1	6,55	7,44	8,07

\* Ensaio realizado aos 5 minutos

\*\* Ensaio realizados aos 15 minutos

\*\*\* Ensaio realizados aos 30 minutos

### Resultados dos ensaios no Cone de Marsh – Filer F2

Mistura	Aditivo (%)	T (s)
1	0,05	3,5
	0,1	2,75
	0,2	3,62
	0,3	2,91
2	0,05	6,62
	0,1	3,85
	0,2	3,91
	0,3	3,59
3	0,05	10,56
	0,1	5,13
	0,2	3,56
	0,3	4,13
4	0,05	3,84
	0,1	5,37
	0,2	3,5
	0,3	3,06
5	0,05	5,09
	0,1	3,22
	0,2	3,47
	0,3	2,88
6	0,05	7,18
	0,1	4,09
	0,2	4,78
	0,3	3,5
7	0,05	9,32
	0,1	4,72
	0,2	5,47
	0,3	4,09
8	0,05	10,84
	0,1	4,91
	0,2	3,75
	0,3	3,15
9	0,05	12,66
	0,1	6,18
	0,2	5,03
	0,3	4,68

## APÊNDICE 2

### Resultados dos ensaios no viscosímetro – Filer F1

Mistura	Aditivo (%)	Viscosidade (Pas)	Tensão de escoamento (Pa)
1	0,1	0,1344	0,6108
	0,2	0,09306	0,138
	0,3	0,06578	0,5907
	0,4	0,07532	0,3198
2	0,1	0,1636	0,6803
	0,2	0,1335	-0,2476
	0,4	0,1188	-0,02198
3	0,1	0,2823	1,255
	0,2	0,1637	0,07618
	0,3	0,1287	-0,2701
	0,4	0,09906	-0,03291
4	0,1	0,118	0,839
	0,2	0,08589	0,4095
	0,4	0,08238	0,1176
5	0,1	0,18	1,295
	0,2	0,1459	0,3448
	0,3	0,1447	0,7846
	0,4	0,1089	-0,06412
6	0,05	0,355	2,934
	0,1	0,1955	0,883
	0,2	0,1253	0,847
	0,4	0,1405	0,217
	0,05	0,2841	3,354
7	0,1	0,2352	1,989
	0,2	0,1301	0,7602
	0,3	0,1241	0,5135
	0,4	0,1506	0,3821
8	0,1	0,2991	1,777
	0,2	0,2035	0,5257
	0,4	0,151	0,2049
	0,6	0,1219	-0,0849
9	0,1	0,2331	0,9864
	0,2	0,1015	-0,6267
	0,4	0,03478	-0,1875

### APÊNDICE 3

#### Resultados dos ensaios de resistência à compressão das argamassas – Filer F1

Mistura	7 dias				28 dias			
	Carga (kN)			f <sub>cj</sub> (MPa)	Carga (kN)			f <sub>cj</sub> (MPa)
1	38,95	38,25	40,55	20,25	51,45	49,85	49,85	25,80
2	36,65	33,75	38,40	19,11	51,40	52,90	46,60	26,56
4	56,85	54,40	58,90	29,48	57,80	72,80	71,10	36,65
5	52,55	54,10	52,75	27,21	69,70	61,30	67,00	34,81
6	57,95	57,95	55,05	29,52	69,80	64,70	65,00	34,33
7	73,20	64,95	73,40	37,33	92,10	82,00	84,50	44,97
8	62,60	70,35	62,20	33,86	81,50	79,20	77,80	40,92
9	75,05	70,25	67,75	37,00	81,60	97,10	80,30	45,51

#### Resultados dos ensaios de resistência à compressão das argamassas – Filer F2

Mistura	7 dias				28 dias			
	Carga (kN)			f <sub>cj</sub> (MPa)	Carga (kN)			f <sub>cj</sub> (MPa)
1	42,70	38,65	39,2	20,86	44,55	49,05	46,90	24,43
2	37,45	38,35	39,2	19,75	44,85	49,45	48,40	24,92
4	50,75	54,00	51,45	26,85	65,00	64,90	68,10	33,90
5	53,70	49,40	54,15	27,47	60,30	61,90	62,60	31,71
6	51,20	54,45	54,45	27,73	61,20	68,80	57,50	33,11
7	69,00	71,25	68,15	35,72	84,30	78,30	86,60	43,52
8	68,55	67,25	65,05	34,58	71,20	57,70	82,10	39,04
9	75,20	71,85	75,40	38,35	83,50	81,00	78,20	41,89

## APÊNDICE 4

### Resultados dos ensaios de resistência à compressão dos concretos – Filer F1

Mistura	7 dias				28 dias			
	Carga (kN)			f <sub>cj</sub> (MPa)	Carga (kN)			f <sub>cj</sub> (MPa)
2	173,0	118,2	173,0	22,03	171,2	211,8	200,8	26,27
4	219,0	189,8	224,2	28,22	288,6	242,8	266,2	35,32
5	191,4	229,2	227,2	29,06	269,2	236,2	255,8	33,42
6	159,8	211,8	214,0	27,11	278,8	274,8	282,6	35,74
8	262,6	255,2	231,6	32,97	341,0	355,5	352,0	45,04

### Resultados dos ensaios de resistência à compressão dos concretos – Filer F1

Mistura	7 dias				28 dias			
	Carga (kN)			f <sub>cj</sub> (MPa)	Carga (kN)			f <sub>cj</sub> (MPa)
1	132,6	147,6	143,6	18,54	195,8	193,6	183,8	24,79
2	146,2	114,6	156,8	19,29	205,0	197,8	190,4	25,64
4	155,2	161,2	170,6	21,12	209,0	214,0	204,8	26,93
5	191,8	199,2	219,6	26,66	275,4	257,6	261	34,15
6	205,4	207,8	189,6	26,31	222,0	141,4	222,4	28,29
7	194,4	186,0	198,8	25,03	243,8	235,2	248,2	31,32
8	297,6	300,0	279,8	38,05	355,00	343,50	348,50	44,79
9	305,6	318,2	284,2	39,71	182,5	216,5	211,0	27,22

## APÊNDICE 5

### Resultados dos ensaios de módulo de elasticidade dos concretos

Mistura	Fíler F1			Fíler F2		
	Ec (GPa)		Ec médio (GPa)	Ec (GPa)		Ec médio (GPa)
1	-	-	-	24,58	26,50	25,54
2	26,65	23,82	25,24	27,22	23,49	25,36
3	-	-	-	26,72	29,12	27,92
4	24,25	28,02	26,13	27,81	24,50	26,15
5	27,46	30,10	28,78	63,90	-	63,90
6	28,81	26,96	27,89	27,21	23,85	25,53
7	-	-	-	28,16	29,02	28,59
8	30,83	31,46	31,15	29,92	28,70	29,31
9	-	-	-	32,10	31,27	31,68